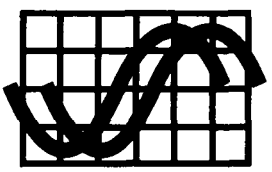
ЭЛЕКТРО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

В ЧЕТЫРЕХ ТОМАХ



ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
профессоров Московского энергетического института (технического университета)
В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского, В.А. Лабунцоаа, В.П. Морозкина,
И.Н. Орлова (глааный редактор), А.И. Попова, В.А. Строева

9-е ИЗДАНИЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

2

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И УСТРОЙСТВА



МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО МЭИ 2003

ББК 31.2
Э45
УДК 621.3(035.5)

Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2.
Э45 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов) — 9-е изд., стер. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — 518 с.

ISBN 5-7046-0986-4
ISBN 5-7046-0984-8

Приводятся сведения по кабельным и электроизоляционным изделиям, полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам, резисторам, конденсаторам, реакторам, трансформаторам и автотрансформаторам, различным типам электрических машин, электрических и электронных аппаратов, электромагнитам и системам с постоянными магнитами, вентильным преобразователем электрической энергии, вторичным источникам электропитания и химическим источникам тока.

Материал тома значительно обновлен, особенно в части элементов и устройств электронной техники, специальных машин, химических источников тока. Приведены современные технические данные устройств, широко применяемых в отечественной электротехнике.

Предыдущее 8-е издание т. 2 справочника было выпущено в 1998г. Т. 1 вышел в 1995 г.

Для широкого круга инженеров-электриков и студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.3(035.5)
ББК 31.2

ISBN 5-7046-0986-4
ISBN 5-7046-0984-8

© Авторы, 1998
© Авторы Т. 2, 1998

ББК 31.2
Э45
УДК 621.3(035.5)

Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2.
Э45 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. И.Н. Орлов) — 9-е изд., стер. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — 518 с.

ISBN 5-7046-0986-4
ISBN 5-7046-0984-8

Приводятся сведения по кабельным и электроизоляционным изделиям, полупроводниковым приборам и интегральным микросхемам, резисторам, конденсаторам, реакторам, трансформаторам и автотрансформаторам, различным типам электрических машин, электрических и электронных аппаратов, электромагнитам и системам с постоянными магнитами, вентильным преобразователем электрической энергии, вторичным источникам электропитания и химическим источникам тока.

Материал тома значительно обновлен, особенно в части элементов и устройств электронной техники, специальных машин, химических источников тока. Приведены современные технические данные устройств, широко применяемых в отечественной электротехнике.

Предыдущее 8-е издание т. 2 справочника было выпущено в 1998г. Т. 1 вышел в 1995 г.

Для широкого круга инженеров-электриков и студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов.

УДК 621.3(035.5)
ББК 31.2

ISBN 5-7046-0986-4
ISBN 5-7046-0984-8

© Авторы, 1998
© Авторы Т. 2, 1998

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 20. Электрические кабели, провода и шины 5
Раздел 21. Электроизоляциоииые конструкции и изоляторы 48
Раздел 22. Интегральные микросхемы 75
Раздел 23. Резисторы, конденсаторы и реакторы 98
Раздел 24. Траисформаторы и автотрансформаторы 125
Раздел 25. Общие вопросы электрических машин 158
Раздел 26. Асинхронные машииы 171
Раздел 27. Синхроиные машины 187
Раздел 28. Машииы постоянного тока 224
Раздел 29. Вентильные электрические машииы 240
Раздел 30. Электрические машины автоматических устройств и силовые микроэлектродвигатели 268
Раздел 31. Осиовные определеиия и классификация электрических аппаратов 291
Раздел 32. Коммутациоиная и защитная аппаратура высокого напряжения 301
Раздел 33. Измерительные трансформаторы тока и напряжения 319
Раздел 34. Аппараты управления и распределительных устройств низкого напряжения 339
Раздел 35. Аппараты автоматики 377
Раздел 36. Электромагниты. Системы с постоянными магнитами 401
Раздел 37. Вентильные преобразователи электрической эиергии и источники вторичного электропитаиия 417
Раздел 38. Химические источники и их применение 498
Предметный указатель 513

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материалы второго тома подготовили:

Раздел 20. Электрические кабели, провода и шины — каид. техи. иаук, доц. Э.Т. Лариида, доктор техн. наук, проф. И.Б. Пешков, канд. техи. наук, доц. И.Б. Рязанов, доктор техи. иаук, проф. С.Д. Холодиый.

Раздел 21. Электроизоляциоииые коиструкции и изоляторы — канд. техи. наук, доц. Ю.Г. Есиков, канд. техи. наук, доц. Ю.С. Пииталь.

Раздел 22. Интегральиые микросхемы — канд. техн. наук, проф. С.Г. Обухов, канд. техн. иаук, доц. Т.В. Ремизевич.

Раздел 23. Резисторы, коидеисаторы и реакторы — канд. техн. наук, доц. Е.Г. Акимов, канд. техн. наук, доц. А.А. Чуиихии

Раздел 24. Трансформаторы и автотрансформаторы — ст. преп. Н.А. Акимова, канд. техн. наук, доц. М.А. Горюиов, доктор техи. наук. проф. П.М. Тихомиров

Раздел 25. Общие вопросы электрических машии — доктор техи. наук, проф. А.В. Иваиов-Смоленский.

Раздел 26. Асинхронные электрические машиы — доктор техн. наук, проф. И.П. Копылов.

Раздел 27. Сиихроиные электрические машиы — доктор техн. наук, проф. А.В. Иваиов-Смоленский.

Раздел 28. Машины постоянного тока — доктор техн. наук, проф. А.В. Иванов-Смолеиский.

Раздел 29. Вентильные электрические машины — канд. техи. наук, доц. В.И. Извеков, доктор техн. иаук, проф. В.А. Кузиецов.

Раздел 30. Электрические машины автоматических устройств и силовые микроэлектродвигатели — доктор техн. наук, проф. И.Л. Осин, доктор техн. иаук, проф. Ф.М. Юферов.

Раздел 31. Основиые определения и классификация электрнческих аппаратов — канд. техн. наук, доц. Ю.С. Коробков, доктор техн. наук, проф. П.А. Курбатов, доктор техн. наук, проф. Г.Г. Нестеров, доктор техн. наук проф. Ю.К. Розаиов, доктор техн. иаук, проф. И.С. Таев, доктор техн. наук, проф. В.Н. Шоффа.

Раздел 32. Коммутациоиная и защитиая аппаратура высокого напряженння — каид. техи. наук, доц. А.А. Чунихин.

Раздел 33. Измерительиые трансформаторы тока н напряженння — канд. техн. иаук, доц. А.А. Чунихии.

Раздел 34. Аппараты управления и распределительных устройств низкого иапряжения — канд. техи. иаук, доц. Т.Н. Дильднна, канд. техн. наук, доц. Ю.С. Коробков, доктор техн. наук, проф. Г.Г. Нестеров, доктор техн. наук, проф. Ю.К. Розанов, канд. техн. наук, доц. В.П. Соколов, доктор техн. наук, проф. И.С. Таев.

Раздел 35. Электрические аппараты автоматикн — канд. техн. наук, доц. Ю.С. Коробков, доктор техн. наук, проф. В.Н. Шоффа.

Раздел 36. Электромагнитны и снстемы с постоянными магнитамн — доктор техн. наук, проф. П.А. Курбатов, доктор техн. наук, проф. В.Г. Сергеев.

Раздел 37. Вентильные преобразователи электрнческой энергии и источнпки вторичного электропитания — канд. техн. наук, доц. Н.Н. Богданов, доктор техн. наук, проф. О.Г. Булатов, канд. техн. наук, доц. П.А. Воронин, канд. техн. наук, проф. С.Г. Обухов, доктор техн. наук, проф. А.Г. Поликарпов, канд. техн. наук, доц. Е.Ф. Сергненко, ст.преп. М.Л. Фраткина.

Раздел 38. Химнческие источники тока и их примеиение — докт. техн. наук, проф. Н.В. Коровин.

Редактирование материалов второго тома осуществлено докторамн техн. наук, профессорами А.И. Поповым и И.Н. Орловым.

Раздел 20

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ, ПРОВОДА И ШИНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

20.1. Классификация кабельных изделий . . 5
20.2. Медная проволока 6
20.3. Проволока алюминиевая и из алюминиевых сплавов 6
20.4. Неизолированные провода 7
20.5. Шины 9
20.6. Контактные провода 9
20.7. Профили для коллекторов электрических машин 10
20.8. Конструкции и маркировка силовых кабелей 11
20.9. Электрические характеристики силовых кабелей 15
20.10. Способы прокладки силовых кабелей 17
20.11. Допустимые токи нагрузки 18
20.12. Арматура силовых кабелей 22
20.13. Контрольные кабели и кабели управления 31
20.14. Силовые и установочные провода и соединительные шнуры 33
20.15. Различные кабели и провода с пластмассовой и резиновой изоляцией 33
20.16. Монтажные кабели и провода 40
20.17. Обмоточные провода с эмалевой изоляцией 42
20.18. Обмоточные провода с волокнистой, эмалево-волокнистой, бумажной и пленочной изоляцией 44
20.19. Обмоточные провода со стекловолокнистой изоляцией 45
20.20. Оптические кабели 46
Список литературы 47

20.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кабельная промышленность выпускает кабельные изделия практически для всех отраслей народного хозяйства.

Кабельные изделия предназначены для передачи и распределения электрической энергии и сигналов связи и информации, выполнения электрических соединений в различных электротехнических устройствах, изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Среди многих систем классификации кабельных изделий наиболее обоснованной является классификация по назначению, хотя можно классифицировать их и по другим признакам, например по области применения.

Ниже приводятся важнейшие группы кабельных изделий и некоторые типы кабелей и проводов, входящих в состав этих групп.

1. *Неизолированные провода* предназначены в основном для использования при строительстве воздушных линий электропередачи. Провода изготавливаются из меди, алюминия, бронзы, а также комбинированными (стальной сердечник, поверх которого накладываются один или несколько повивов алюминиевой проволоки).

2. *Силовые кабели* предназначены для передачи и распределения электрической энергии. Кабели выпускаются с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами с изоляцией из бумажных лент, пропитанных маслом или специальными составами, а также с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, полиэтилена, сшитого полиэтилена, резины. Диапазон переменного напряжения, в котором используются силовые кабели, — от 660 В до 500 кВ. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые или пластмассовые оболочки.

3. *Кабели связи* предназначены для передачи сигналов связи и информации. Кабели имеют медные жилы и бумажную или пластмассовую изоляцию. В качестве пластмасс используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, полистирол. Изоляция может быть комбинированной: воздушно-бумажной или воздушно-полиэтиленовой. Кабели имеют свинцовые, алюминиевые, стальные, пластмассовые или металлопластмассовые оболочки. Кабели связи делятся на высокочастотные и низкочастотные. Высокочастотные кабели — это кабели дальней связи, низкочастотные — кабели местной связи (городские телефониые, внутрирайониые и т.п.).

4. *Контрольные кабели* предназначены для питания приборов, аппаратов и других электротехнических устройств и используются в цепях контроля. Контрольные кабели имеют токопроводящие жилы из меди, биметалла алюминий-медь, алюминия. Изоляция в основном из полиэтилена и поливинилхлоридного пластиката. Используется также резиновая изоляция. Число токопроводящих жил — от 4 до 37, сечения — от 0,75 до 10 мм^2.

5. *Кабели управления* используются для целей дистанционного управления и имеют медные жилы. В качестве изоляции используются полиэтилен, поливинилхлоридный пластикат, фторопласт, резина. Число токоведущих жил — от 3 до 108. Все или отдельные токопроводящие жилы могут быть экранированными. Оболочки кабелей — пластмассовые. Поверх оболочки может накладываться панцирная броня из стальных проволок. Кабели управления могут иметь круглую или плоскую форму.

6. *Монтажные провода* используются для выполнения групповых соединеиий в различных схемах, т.е. для межблочного и внутриблочного монтажа аппаратуры. Токопроводящие жилы — медные, в том числе с покрытиями из серебра, никеля и олова, изоляция — полиэтилен, поливинилхлоридный

пластикат, фторопласты. Часть монтажных проводов выпускается с изоляцией иа основе стекловолокиа, волокон лавсана и капрона, наложенной методом обмотки, с поверхностным лаковым покрытием. Монтажные провода могут выполняться не только круглыми, но и плоскими.

7. *Силовые (установочные) провода* предиазначены для распределения электрической эиергии в силовых и осветительных сетях иа открытом воздухе и внутри помещеиий, в том числе для скрытой прокладки под штукатуркой, для выводов электродвигателей и питания различной переносной аппаратуры и приборов. Провода выпускаются одио- и многожильными (до 30 жил) и в основном рассчитаны на напряжеиия до 3 кВ. Установочиые провода изготавливаются с токопроводящими жилами из алюминия, меди и биметалла алюминий-медь. Изоляция — поливинилхлоридный пластикат, полиэтилен, резина, асбест, стекловолокно, резииостеклоткань. Диапазон сечений — от 0,50 до 120 мм^2. В соответствии с ГОСТ 22483-77 установлен следующий ряд сечений жил кабелей и проводов, мм^2: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,50; 0,75; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 16; 25; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000; 1200; 1600; 2000.

8. *Обмоточные провода* предназначаются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Токопроводящие жилы изготовляются из меди, алюминия, сплавов сопротивления (нихром, манганин, константан). В качестве изоляции применяются эмалевые покрытия на основе синтетических лаков, пропитанное лаками волокно, натуральный шелк, синтетическая и хлопчатобумажная пряжа, пленки, бумага, пластмассы. В ограиииченном объеме выпускаются обмоточные провода со сплошной стеклянной и стеклоэмалевой изоляцией. Диапазон размеров — от диаметра 12 мкм для круглых проводов до сечения 60÷80 мм^2 для прямоугольных проводов.

9. *Радиочастотные кабели* предназиачеиы для передачи высокочастотиой энергии между антениами и различными радиотехническими и электронными устройствами, а также для соединеиий внутри этих устройств. Выпускаемые кабели в осиовном имеют коаксиальную конструкцию. Внутренний проводник медный, изоляция из полиэтилена, фторопласта или полувоздушиая (пористые пластмассы, шайбы, кордель и т.п.). Поверх изоляции наложены внешний проводник и защитная оболочка из полиэтилеиа или поливинилхлоридного пластиката.

Рассмотреиные группы кабельных изделий далеко не исчерпывают иоменклатуру кабелей и проводов, насчитывающую около 30 000 макроразмеров. В частности, выпускаются судовые, грузоиесущие, геофизические кабели, кабели для электрофильтров, бортовые провода, провода зажигания, жгуты автомобильиых и автотракторных проводов и др.

В иастоящем разделе рассматриваются только те группы кабельиой продукции, которые предназначеиы для удовлетворения потребиостей электротехники и энергетики. В частиости, не приводятся сведения о кабелях связи, радиочастотных кабелях, используемых в технике связи.

20.2. МЕДНАЯ ПРОВОЛОКА

Медная проволока выпускается круглого и прямоугольного сечений и предиазначена для изготовления проводов, кабелей и других электротехиических изделий. Круглая проволока изготовляется мягкой (марка ММ), твердой (марка МТ) и для связи (марка МС) по ТУ 16.К71-087-90. Медная круглая проволока выпускается в диапазоне диаметров 0,02—11,0 мм. Предельиые отклоиения диаметра составляют от ±0,002 мм для тончайшей проволоки до ±0,070 мм для проволоки максимальных диаметров.

Удельное электрическое сопротивление мягкой проволоки постоянному току при 20 °С не должно превышать 0,01724, твердой — 0,0180 мкОм·м.

Медная проволока прямоугольного сечения марок ПММ (мягкая) и ПМТ (твердая) изготовляется по ГОСТ 434-78. Если меньшую сторону проволоки обозначить *а* (толщина), а большую *b* (ширина), то *а* иаходится в пределах 0,08÷5, а *b* равна 2÷30 мм. В этом случае сечение выпускаемой прямоугольной проволоки колеблется от 1,46 до 149,14 мм^2.

Сечеиия прямоугольиой медной проволоки рассчитываются с учетом радиусов закругления углов, которые составляют 0,5*а* при размере *а* до 1,00 мм включительио, 0,5 мм при *а* = 1,00÷1,60 мм, 0,65 мм при *а* = 1,60÷2,24 мм, 0,8 мм при *а* = = 2,24÷3,55 мм, 1,0 мм при *а* = 3,55 мм и более. Предельные отклонения размеров проволоки в зависимости от размеров сторои сечения составляют ±0,02÷ ±0,35 мм.

На круглую медную проволоку, предиазиачеиную для последующего эмалирования, распространяется специальная техдокументация, которая регламентирует ряд повышенных требоваиий к качеству проволоки по сравнению с ТУ 16.К71-087-90. Прежде всего это касается допусков на диаметр, которые зиачительно жестче. Так, предельные отклоиеиия размера составляют +0,002÷—0,001 мм для проволоки диаметром 0,071—0,10 мм, +0,005÷ —0,002 мм для проволоки диаметром 0,30÷0,50 мм и т.д. Овальность проволоки не должна выводить размеры за предельиые отклоиеиия по диаметру.

20.3. ПРОВОЛОКА АЛЮМИНИЕВАЯ И ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Круглая алюмииииевая проволока, предназначеиная для производства проводов и кабелей и других электротехнических изделий, в соответствии с ТУ 16.К71-088-90 изготовляется твердой (марка АТ), полутвердой (марка АПТ) и мягкой (марка АМ). Проволока изготовляется из алюмиииевой катаики и выпускается в диапазоне диаметров от 0,10 до 18,0 мм. В зависимости от диаметра проволоки предельные отклонения размеров проволоки колеблются от ±0,004 до ±0,10 мм. Зиачение удельиого электрического сопротивления проволоки постоянному току, пересчитаиное иа температуру 20 °С, ие должно превышать 0,0283 мкОм·м для проволоки марок АТ и АПТ и 0,0280 мкОМ·м для проволоки марки АМ.

Круглая проволока из алюминиевого сплава марки АВ-Е изготовляется по ТУ 16-501.016-74 и предназначается в основном для неизолированных проводов. Твердая проволока марки АСТ, мягкая — марки АСМ и термомеханически обработанная (закалка — волочение — искусственное старение) марки АСЗ изготовляются диаметром 1—5 мм. Электрическое сопротивление постоянному току не должно превышать 0,030 мкОм·м для твердой проволоки; 0,0295 мкОм·м для мягкой и 0,0325 мкОм·м для термомеханически обработанной.

Удельное электрическое сопротивление мягкой алюминиевой проволоки не должно превышать 0,0280 мкОм·м; твердой повышенной прочности, твердой и полутвердой — 0,0283 мкОм·м; проволоки, предназначенной для неизолированных линий электропередачи, — 0,028264 мкОм·м.

Прямоугольная алюминиевая проволока, предназначенная для производства обмоточных проводов и других электротехнических изделий, изготовляется по ТУ 16-705.451-87. Проволока должна изготовляться твердой марки ПАТ и мягкой марки ПАМ. Номинальные размеры проволоки по большей стороне b находятся в пределах от 2 до 18 мм, по меньшей стороне a от 0,8 до 5,6 мм. Диапазон сечений выпускаемой прямоугольной алюминиевой проволоки от 1,46 до 100 мм^2.

Для изготовления проволоки применяются алюминиевые слитки или алюминиевая катанка. Проволока имеет закругленные углы, причем в зависимости от размеров проволоки радиус закругления составляет 0,5÷1,0 мм.

Удельное электрическое сопротивление проволоки постоянному току должно составлять не более 0,0280 мкОм·м для мягкой и не более 0,0283 мкОм·м для твердой проволоки.

20.4. НЕИЗОЛИРОВАННЫЕ ПРОВОДА

Неизолированные провода из меди, алюминия, алюминиевых сплавов, сталеалюминиевые изготовляются в соответствии с ГОСТ 839-80 и предназначены для передачи электрической энергии в воздушных электрических сетях. Марки, конструкции и преимущественные области применения неизолированных проводов приведены в табл. 20.1.

Таблица 20.1. **Марки, конструкции и преимущественные области применения неизолированных проводов**

Марка провода	Конструкция провода	Преимущественные области применения
М	Провод, состоящий из одной или нескольких скрученных медных проволок	В атмосфере воздуха типов II и III, на суше и в море всех климатических районов по ГОСТ 15150-69
А	Провод, состоящий из скрученных алюминиевых проволок	В атмосфере воздуха типов I и II при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 мг/(м^2·сут), на суше всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ и ТС
АС	Провод, состоящий из стального сердечника и алюминиевых проволок	То же
АпС	То же, но из алюминиевых проволок марки АТп	" "
АСКС	Провод марки АС, но межпроволочное пространство стального сердечника, включая его наружную поверхность, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах с атмосферой воздуха типов II и III, но при условии содержания в атмосфере сернистого газа, дающего осадок не более 150 лит/(м^2·сут) и хлористых солей не более 200 мг/(м^2·сут) на суше всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69, кроме районов ТВ
АКП	Провод марки А, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	На побережьях морей, соленых озер, в промышленных районах и в районах засоленных песков, а также в прилегающих к ним районах с атмосферой воздуха типов II и III, на суше и в море всех микроклиматических районов по ГОСТ 15150-69
АпКП	То же, но провод марки Ап	То же
АСКП	См. марку АСКС	" "
АпСКП	То же, но провод марки АпС	" "
АСК	Провод марки АС, но стальной сердечник изолирован двумя лентами полиэтилентерефталатной пленки. Стальной сердечник под лентами должен быть покрыт нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АСКС

Окончание табл. 20.1

Марка провода	Конструкция провода	Преимущественные области применения
АпСК	То же, но провод марки АпС	То же
АН	Провод, скрученный из проволок из нетермообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АНКП	Провод марки АН, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП
АЖ	Провод, состоящий из скрученных проволок из термообработанного алюминиевого сплава	См. марку А
АЖКП	Провод марки АЖ, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости	См. марку АКП

Примечания: 1. Типы атмосфер воздуха делятся на I, II и III в зависимости от содержания коррозионно-активных агентов. Атмосфера типа I примерно соответствует атмосфере сельской, лесной, горной местности вдали от промышленных объектов, типа II — атмосфере промышленных районов, типа III — морской.

2. Микроклиматический район ТВ — район с влажным тропическим климатом, ТС — с сухим тропическим климатом (исполнения электротехнических изделий для эксплуатации в этих районах могут быть обозначены термином "тропическое исполнение").

По требованию потребителя алюминиевые и сталеалюминиевые провода марок АКП, АНКП, АЖКП, АСКП могут изготовляться с наружной поверхностью, покрытой термостойкой смазкой. В этом случае к марке провода добавляют букву З.

Медные неизолированные провода выпускаются в диапазоне сечений от 4 до 400 мм^2 с числом проволок от 1 до 37, алюминиевые — от 16 до 800 мм^2 с числом проволок от 7 до 61, из алюминиевого упрочненного сплава — от 16 до 185 мм^2 с числом проволок от 7 до 19.

Провода типа АС выпускаются в диапазоне сечений: для сечения алюминиевой части провода — от 10 до 100 мм^2, для сечения стального сердечника — от 1,8 до 336 мм^2. Число проволок, образующих стальной сердечник, колеблется от 1 до 61; алюминиевая часть содержит от 6 до 96 проволок.

Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода приведены в табл. 20.2.

Срок службы неизолированных проводов должен быть: не менее 45 лет — для проводов марок М, А, Ап, АС, АпС; 25 лет — для проводов марок АКП, АпКП, АН, АНКП, АЖ, АЖКП, АСКП, АпСКС; 10 лет — для проводов марок АСКС, АпСКС, АСК, АпСК.

Кабельной промышленностью выпускаются также полые неизолированные провода без поддерживающей опоры, применяемые в воздушных электрических сетях для передачи электроэнергии, для ошиновки станций и переключательных пунктов.

Таблица 20.2 Допустимые длительные токовые нагрузки на неизолированные провода, А (по данным института "Энергосетьпроект")

Сечение, мм^2	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм^2	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм^2	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений	Сечение, мм^2	Марка провода	Вне помещений	Внутри помещений
10/1,8	АС	84	53	70/11	АС	265	210	150	А	440	355	300	М	880	740
10	М	95	60	70	М	337	268	185/24	АС	520	430	300	А	680	570
16/2,7	АС	111	79	70	А	265	210	185/29	АС	510	425	330/27	АС	730	—
16	М	133	102	95/16	АС	330	260	185/43	АС	515	—	400/22	АС	830	713
16	А	105	75	95	М	422	341	185	М	650	540	400/51	АС	825	705
25/4,2	АС	142	109	95	А	320	255	185	А	500	410	400/64	АС	860	—
25	М	183	137	120/19	АС	390	313	240/32	АС	605	505	400	М	1050	895
25	А	136	106	120	М	485	395	240/39	АС	610	505	400	А	815	690
25/6,2	АС	175	135	120	А	375	300	240/56	АС	610	—	500/27	АС	960	830
35	М	223	173	120/27	АС	375	—	240	М	760	685	500	А	980	820
35	А	170	130	150/19	АС	450	365	240	А	590	490	600/72	АС	1050	920
50/8	АС	210	165	150/24	АС	450	365	300/39	АС	710	600	600	А	1100	955
50	М	275	219	150/34	АС	450	—	300/48	АС	690	585	700/86	АС	1180	1040
50	А	215	165	150	М	570	465	300/66	АС	680	—				

Примечания: 1. Длительные токовые нагрузки одинаковы для проводов марок АС, АСКС, АСК и АСКП.

2. Для сталеалюминиевых проводов в числителе показано сечение алюминия, а в знаменателе — сечение стали.

Полые провода выпускаются медными (марка ПМ) сечением 240 и 300 мм^2 и алюминиевыми (марка ПА) сечением 500 и 640 мм^2 по ТУ 16.505.397-72.

Медные неизолированные гибкие провода, выпускаемые по ТУ 16-705.466-87, применяются в электротехнических установках и устройствах, а также используются в качестве антенн. Провода изготовляются следующих марок: МА — медный антенный, МГ — медный гибкий, МГЭ — медный гибкий для электропечей. Провода марки МА выпускаются в диапазоне сечений от 1,5 до 16,0 мм^2 с числом скрученных проволок в жиле от 7 до 19, марки МГ — от 1,5 до 500 мм^2 с числом проволок от 19 до 703, марки МГЭ — от 240 до 1000 мм^2 с числом проволок от 570 до 1026.

20.5. ШИНЫ

Шины электротехнического назиачения выпускаются медными и алюминиевыми. Медные шины (ГОСТ 434-78) применяются в тех случаях, когда используется их повышенная гибкость, в коррозионных условиях и т.д. Марки медных шин: ШММ — шины мягкие медные, ШМТ — шины медные твердые, ШМТВ — шины медные твердые из бескислородной меди. Обозначения размеров шин такие же, как и для прямоугольной проволоки: a — меньшая сторона (толщина), b — большая сторона (ширина).

Номинальный размер шин по стороне a составляет от 4 до 30, по стороие b — от 16 до 120 мм. Минимальное сечение выпускаемых медных шии 180, максимальное — 1500 мм^2. Предельные отклонения размеров шин по сторонам a и b иаходятся в пределах ±0,02÷0,35 мм в зависимости от размеров шин.

Число Бринелля шин марок ШМТ и ШМТВ должно быть не менее 65. Серповидность твердых медных шин не должна по стороне превышать 4 мм на 1 м длины, а для лент толщиной 3 мм и более — 3 мм на 1 м длины. Шины упаковываются в пачки. Гарантийный срок хранения твердых шин 6 мес. с момента изготовления, мягких шин — 12 мес.

Неизолированные алюминиевые шины прямоугольного сечения марки ШАТ, предиазначеиные для токопроводов, распределительных устройств, сборок и других электрических изделий, выпускаются по ТУ 16-705.002-77. Шины изготовляются из твердой алюминиевой проволоки. Алюминиевые шины марки ШАТ выпускаются размером по стороне a от 3 до 12, по стороне b — от 10 до 120 мм. Расчетные сечения этих шин от 30 до 1440 мм^2.

Предельные отклонения по толщине составляют: ±0,25 мм при a = 3 мм; ±0,30 мм при a = 4÷6 мм; ±0,40 мм при a = 8 и 10 мм; ±0,50 мм при a = = 12 мм. По требованию потребителя шиины могут выполняться с радиусом закругления, равным $a/2$. Шины изготовляются в полосах длиной от 3 до 9 м, а шиины толщиной до 6 мм включительно могут поставляться свернутыми в бухты. Серповидность шин, если они поставляются в полосах, не должна превышать 3 мм на длине 1 м.

Удельное электрическое сопротивление шин постоянному току не должно превышать 0,0282 мкОм·м. Предел прочиости при растяжении шин составляет для сечеиий до 500 мм^2 не менее 118 МПа, для сечений свыше 500 мм^2 — не меиее 113 МПа. Относительное удлинение должио быть соответствеиио не менее 5 и 6%. Срок службы алюминиевых неизолироваиных шин установлен равным 25 годам.

Прессованные шины прямоугольного сечения электротехиического назначения выпускаются из алюминия и алюминиевого сплава в соответствии с ГОСТ 15176-89. Сечение шин от 0,29 до 359 см^2, ширина от 10 до 500 мм, толщииа от 3 до 110 мм.

Шины по состоянию материала изготовляются без термической обработки (горячепрессованными), закаленными и естественно состаренными, неполностью закаленными и искусственно состареиными.

Удельное электрическое сопротивление шин постоянному току при температуре 20 °С должно быть не более 0,0290 мкОм·м для шин из алюминия марок АДО, АДОО, А7, А6, А5, А5Е; не более 0,0310 мкОм·м для горячепрессоваиных шин из алюмииневых сплавов марок АД 31 и АД 31Е; не более 0,0350 мкОм·м для шин из алюминиевых сплавов марок АД 31 и АД 31Е в закалением и естественно состаренном состоянии; не более 0,0325 мкОм·м для шии из алюминиевых сплавов марок АД 31 и АД 31Е в закаленном и искусственно состаренном состояиии и не более 0,0330 мкОм·м для шин из алюминиевого сплава марки АД 31 в неполностью закаленном и искусственно состаренном состоянии.

Прессованные алюминиевые шины поставляются в кусках или бухтах. Если шины изготовляются мерной длиной, то эта длина составляет от 3 до 10 м в зависимости от сечения шин.

20.6. КОНТАКТНЫЕ ПРОВОДА

Основная часть контактных проводов изготовляется из низколегированной меди и броиз. Контактные провода применяются в воздушных электрических сетях для передачи энергии электротранспорту.

Бесстыковые медные низколегированные и бронзовые контактиые провода выпускаются в соответствии с ГОСТ 2587-86. Провода изготовляются круглыми, фасонными (рис. 20.1) и фасоиными овальиыми (рис. 20.2). Марки выпускаемых проводов и условия их применения указаны в табл. 20.3.

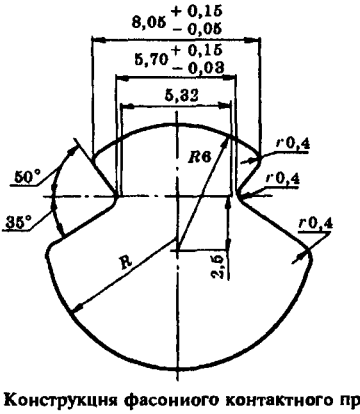


Рис. 20.1. Конструкцня фасониого контактного провода

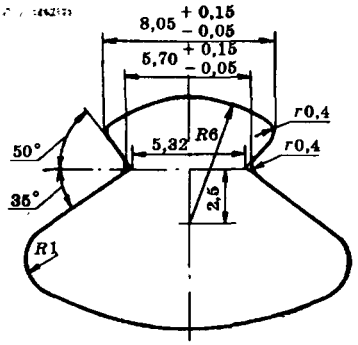


Рис. 20.2. Конструкция овального контактного провода

Таблица 20.3. Марки и условия применения контактных проводов

Марка провода	Наименование провода	Условия применения	
		Допустимая температура применения, °С	Предел прочности при растяжении, МПа, не менее
МК	Контактный медный круглый	90	118
МФ	Контактный медный фасонный	95	118
МФО	Контактный медный фасонный овальный	95	118
НЛФ	Контактный низколегированный фасонный	110	127
НЛФО	Контактный низколегированный фасонный овальный	110	127
БрФ	Контактный бронзовый фасонный	130	137
БрФО	Контактный бронзовый фасонный овальный	130	137

Медные контактные провода должны изготовляться из катанки, полученной методом непрерывного литья и прокатки, со светлой поверхностью, не требующей последующего травления. Марки фасонных и фасонных овальных проводов устанавливаются в зависимости от химического состава. Так, фасонный низколегированный провод с присадкой 0,05% Mg имеет марку НлМг0,05Ф, с 0,05% Zr — НлЦр0,05Ф и т.д. В качестве присадок для низколегированных контактных проводов используются Mg (0,04÷0,30%), Zr (0,04÷0,6%), Sn (0,03÷0,06%), Cd (0,8÷1,1%). Удельное электрическое сопротивление проводов постоянному току при 20 °С должно быть не более 0,017 мкОм·м для медных проводов; 0,017 ÷ 0,0185 мкОм·м для низколегированных; 0,0205 мкОм·м для проводов из кадмиевой бронзы; 0,0220 мкОм·м из магниевой бронзы; 0,0200 мкОм·м из магниево-циркониевой бронзы.

Таблица 20.4. Износостойкость контактных проводов

Марка провода	Допустимый износ контактных проводов, мм², не более, на 10 000 проходов токоприемников, оборудованных медными токосъемными пластинами, при потреблении тока электроподвижным составом в следующих диапазонах		
	до 1000 А	1000÷2000 А	выше 2000 А
МФ100	0,300	0,650	1,00
НЛФ100	0,225	0,522	0,765
БрМг0,25Ф	0,150	0,400	0,700
БрЦр0,5Ф	0,075	0,300	0,500
БрКд1Ф	0,130	0,350	0,600

Износостойкость контактных проводов должна соответствовать данным, приведенным в табл. 20.4.

Значения износостойкости бронзовых контактных проводов, изготовленных из трехкомпонентных сплавов, должны быть на 10—15% выше, чем у проводов из циркониевой бронзы. Гарантийный срок эксплуатации при соблюдении потребителем условий хранения, транспортирования и применения (эксплуатации) для медных контактных проводов не менее 5 лет, низколегированных — не менее 6,5, бронзовых — не менее 10 лет.

20.7. ПРОФИЛИ ДЛЯ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Профили для коллекторов электрических машин (рис. 20.3) изготовляются из меди и из меди, легированной серебром по ТУ 16-501.033-87.

Медные коллекторные профили имеют марку ПМК, профили из сплава с серебром — ПКМС. Профили изготовляются нормальной, повышенной и высокой точностн. Размеры поперечных сечений профилей должны удовлетворять условиям: при зна-

Таблица 20.5. Значение толщины профиля *t* в зависимости от высоты профиля *H*

Высота профиля *H*, мм	Толщина профиля *t*, мм, не менее
До 31,5	0,76
Свыше 31,5 до 40	0,96
Свыше 40	1,10

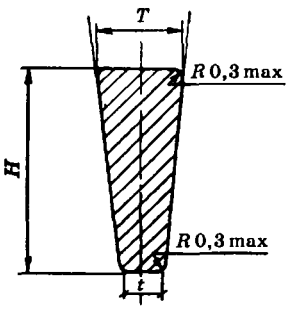


Рис. 20.3. Форма поперечного сечения профиля для коллекторов электрических машин

Таблица 20.6. Буквенные обозначения в маркировке кабелей

Буква или сочетание букв	Значение буквы или сочетания букв	Буква или сочетание букв	Значение буквы или сочетания букв
А	Алюминиевая жила	С	Свинцовая оболочка
АС	Алюминиевая жила и свинцовая оболочка	О	Отдельные оболочки поверх каждой фазы
АА	Алюминиевая жила и алюминиевая оболочка	В — в конце обозначения через черточку	Обедненно-пропитанная бумажная изоляция
Б	Броня из двух стальных лент с антикоррозионным защитным покровом		
Би	То же, но с негорючим защитным покровом (не поддерживающим горение)	Ц	Бумажная изоляция, пропитанная нестекающим составом
Г	Отсутствие защитных покровов поверх брони или оболочки	НР	Резиновая изоляция и оболочка из резины, не поддерживающей горение
л(2л)	В подушке под броней имеется слой (два слоя) из пластмассовых лент	В	Изоляция или оболочка из поливинилхлорида
		П	Изоляция или оболочка из термопластичного полиэтилена
в(п)	В подушке под броней имеется выпрессованный шланг из поливиниилхлорида (полиэтилена)	Пс	Изоляция или оболочка из самозатухающего полиэтилена (не поддерживающего горение)
Шв (Шп)	Защитный покров в виде выпрессованного шланга (оболочки) из поливинилхлорида (полиэтилеиа)	Пв	Изоляция из вулканизированного полиэтилена
К	Броня из круглых оцинкованных стальных проволок, поверх которых наложен защитный покров	ББГ	Броня профилированной стальной ленты
		У	Для кабелей, изготовленных после 01.04.85. Изоляция может работать при температурах 80, 70, 65 °С соответственно для кабелей на напряжения 6, 10, 20 и 35 кВ
П	Броня из оцинкованных плоских проволок, поверх которых наложен защитный покров		

Таблица 20.7. Номенклатура силовых кабелей

Марка	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жил, мм^2					
ААГ, АСГ, СГ, ААШв, ААШп	1	10÷800	10÷625	—	—	15÷400	120÷300
ААБлГ, ААБл, ААБ2л, АБ2лШв, ААБ2лШп, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБ2л, СБ2л, АСБн, СБи, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГУ	1	10÷800	10÷625	—	—	—	—
ААПлГ, АСП, СП, ААПл, ААП2л, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, ААПлШв	1	50÷800	35÷625	—	—	—	—
ААП2лШв-В, ААБл-В, ААШв-В, ААБ2л-В, АСБ-В, АСБи-В, АСБлн-В, АСБл-В, СБ2л-В, СБ-В, СБл-В, СБи-В, АСБл-В	1	10÷500	10÷500	—	—	—	—
АСБГ-В, СБГ-В	1	10÷625	—	—	—	—	—
АСБ2л, СБ2лГ-В	1	—	240÷625	—	—	—	—
ААПл-В, ААПлГ-В, АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, АСП2л-В, СП2л-В, АСПлн-В, СПли-В, АСПГ-В, СПГ-В	1	50÷500	35÷500	—	—	—	—
АСП2лГ-В, СП2лГ-В	1	—	240÷625	—	—	—	—
АСК, СКл, ЦААШв, ЦСШв, ЦАСШв	1	—	—	—	—	—	120÷300
ААБл, ААБл-В, АСБ, СБ, АСБ-В, СБ-В, АСБл, СБл, АСБл-В, СБл-В, АСП2л, СП2л, АСПл, СПл, СКл, АСКл	1 — основная и 2 — контрольные	240÷800+2×1	—	—	—	—	—

Окончание табл. 20.7

Марка	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ					
		1	3	6	10	20	35
		Номинальное сечение жил, мм^2					
АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, СБ2л, АСБ2л, АСБн, СБи, АСБли, СБли, АСБГ, СБГ	2	6÷150	—	—	—	—	—
АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПГ, СПГ	2	25÷150	—	—	—	—	—
АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБли-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	2	6÷120	—	—	—	—	—
АСП-В, СП-В, АСПл-В, СПл-В, СПГ-В, АСПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	2	25÷120	—	—	—	—	—
ААГ, ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБлГ, ААБ2л, АСГ, СГ, АСШв, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБ2л, СБ2л, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2лШв, СБ2лШв, АСБ2лГ, СБ2лГ	3	6÷240	6÷240	10÷240	16÷240	—	—
СШв, СБШв	3	16÷240	—	10÷240	16÷240	—	—
ААПл, ААПлГ, ААП2л, ААП2лГ, ААП2лШв, АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСКл, СКл, АСП2лГ, СП2лГ	3	25÷240	25÷240	16÷240	16÷240	—	—
СПШв	3	25÷240	—	16÷240	16÷240	—	—
АОСБ, ОСБ, АОСБн, АОСБГ, ОСБГ, ОСБи	3	—	—	—	—	—	120÷150
АОСК, ОСК	3	—	—	—	—	25÷185	120
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБи-В, АСБлн-В, СБлн-В, ААГ-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В, ААШп-В, ААБлГ-В	3	6÷120	6÷120	16÷120	—	—	—
ААБв, ААБвГ	3	—	÷	10÷240	16÷240	—	—
ААШв-В, ААБГл-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2лГ-В	3	185÷240	—	—	—	—	—
ААПл-В, ААПлГ-В, АСП-В, СП-В, СПл-В, АСПл-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСП2л-В, СП2л-В	3	25÷150	25÷150	16÷120	—	—	—
ЦААБл, ЦААБ2л, ЦААБШв, ЦААБШп, ЦААБлГ, ЦААБлн, ЦААПл, ЦААП2л, ЦААПлГ, ЦААПлн, ЦААПлШв, ЦААШв, ЦАСБ, ЦСБ, ЦСБГ, ЦАСБн, ЦСБн, ЦСШв, ЦАСШв, ЦАСБШв, ЦСПШв, ЦСБШв, ЦАСП, ЦАСПл, ЦСБл, ЦСП, ЦАСПГ, ЦСПГ, ЦАСПн, ЦСПн, ЦАСБл, ЦАСПШв, ЦАСПл, ЦСПл, ЦАСКл, ЦСКл, ЦААБв, ЦААБвГ	3	—	—	25÷185	25÷185	—	—
ЦАОСБ, ЦОСБ, ЦАОСБГ, ЦОСБГ	3	—	—	—	—	—	120÷150

Примечание. Для кабелей, изготовленных после 1 апреля 1985 г., к обозначению марки кабеля добавляется буква У. Например, СБУ, ААГУ, ЦААБлУ, СПлУ-В. В этих кабелях допускается более высокая температура жилы, при этом увеличивается допустимый ток нагрузки.

Таблица 20.8. **Четырехжильные силовые кабели на напряжение 1 кВ***

Обозначение марок	Сечение жил, мм^2
ААГ, ААШп, ААШв, ААБлГ, ААП2лШв, ААБл, АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБи, СБн, АСБли, СБли, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСШв, СШв, СБШв	10÷185**
ААПл, ААП2л, ААПлГ, АСП, СП, АСПл, СПл, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСП2л, СПШв	16÷185**
АСКл, СКл	25÷185**
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБи-В, АСБлн-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	10÷120
ААБлГ-В	16÷120
АСБГ-В, СБГ-В	10÷185
ААПл-В, ААПлГ-В, СП-В, АСП-В, АСПл-В, СПн-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2л-В	16÷120

* Применяют также трехжильные кабели в алюминиевой оболочке, а вместо жилы зануления используют оболочку для режимов эксплуатации, предусмотренных Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

** Жилы одинакового сечения до 120 мм^2 включительно.

Таблица 20.9. **Сечение нулевой жилы для конструкций с уменьшенным сечением этой жилы в четырехжильных кабелях**

Сечение основных жил, мм^2	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185
Сечение нулевой жилы, мм^2	6	10	16	16	25	35	50	70	70	95

Таблица 20.10. **Число и сечения жил кабелей с резиновой изоляцией**

Марка кабеля	Число основных жил	Номинальное переменное напряжение 660 В (постоянное 1000 В)	Номинальное постоянное напряжение кабеля, В		
			3000	6000	10000
		Номинальное сечение жил, мм^2			
СРГ	1	1÷240	1,5÷500	2,5÷500	240÷400
АСРГ	1	4÷300	4÷500	4÷500	240÷400
СРГ	2 и 3	1÷185	—	—	—
АСРГ	2	4÷240	—	—	—
АСРГ	3	2,5÷240	—	—	—
ВРГ, НРГ	1÷3	1÷240	—	—	—
АВРГ, АНРГ	1	4÷300	—	—	—
АВРГ, АНРГ	2 и 3	2,5÷300	—	—	—
СРБГт, АСРБГт	1	—	240, 400, 500	—	—
СРБГ, АСРБГ	1	—	—	95, 240, 400, 500	—
СРБ, СРБГ, ВРБн, ВРБ, ВРБГ, НРБ, НРБГ	2 и 3	2,5÷185	—	—	—
АСРБ, АСРБГ, АВРБ, АВРБи	2	4÷240	—	—	—
АВРБГ, АНРБ, АНРБГ	3	2,5÷240	—	—	—

Примечание. Двух- и трехжильные кабели могут быть изготовлены с дополнительной заземляющей или нулевой жилой.

Таблица 20.11. Силовые кабели с пластмассовой изоляцией

Обозначение марки кабеля	Число жил	Номинальное напряжение, кВ			
		0,66	1	3	6
		Сечение жил, мм^2			
ВВГ, ПВГ, ПсВГ, ПвВГ	1, 2, 3, 4	1,5÷50	1,5÷240	—	—
АВВГ, АПВГ, АПсВГ, АПвВГ	1, 2, 3, 4	2,5÷50	2,5÷240	—	—
АВБбШв, ВБбШв, АПБбШв, ПВбШв, АПсБбШв, ПсБбШв, АПвБбШв, ПвБбШв	2, 3, 4	4÷50	6÷240	6÷240	—
АВАШв, ВАшВ, АПвШв, ПвАШв	3, 4	—	6÷240	6÷240	10÷240
АВВГ, ВВГ, АПВГ, ПВГ, АПсВГ, ПсВГ, ПвВГ, АВБбШв, ВБбШв, АПБбШв, ПБбШв, АПсБбШв, ПсБбШв, АПвБбШв, ПвБбШв	3	—	—	—	10÷240
ВВГ, ПВГ, ПсВГ, ПвВГ	5	—	1,5÷25	—	—
АВВГ, АПВГ, АПсВГ, АПвВГ	5	—	2,5÷35	—	—

Таблица 20.12. Основные геометрические параметры и массы маслонаполненных кабелей марки МВДТ с медной жилой во временной свинцовой оболочке

Параметры кабеля	Номинальное напряжение, кВ							
	110			220			380	525
Сечение жилы, мм^2	270	425	700	300	550	700	550	625
Диаметр, мм:								
по временной свинцовой оболочке	56,5	60,8	67,7	79,3	82,1	84,9	97,4	107,4
по полукруглым проволокам	49,3	53,6	60,5	70,7	73,5	76,5	90,2	100,2
Масса, т/км:								
в свинцовой оболочке	10,1	13,1	17,0	17,9	20,6	22,7	25,3	29,6
при снятой свинцовой оболочке	4,4	7,0	10,0	8,5	11,0	12,6	13,0	15,6
Внутренний диаметр стального трубопровода, мм	150	150	199	199	199	199	253	253

Марка ОСБ — кабель с отдельно освинцованными жилами (см. рис. 20.5) с броней из стальных лент с защитными покровами.

Ассортимент изготовляемых кабелей приведен в табл. 20.7—20.11.

Маслонаполненные кабели низкого давления имеют марки МНС, МНСА, МНСК, МНСШв, МНАШву, МНАгШву (ГОСТ 16441-78). Сечение жил кабелей на напряжение 110 кВ находится в пределах 120÷800 мм^2, при этом наружный диаметр составляет 50÷75 мм. Для кабелей на напряжение 220 кВ сечение жил 300÷800 мм^2, а наружный диаметр 80÷92 мм.

Параметры маслонаполненного кабеля высокого давления марки МВДТ приведены в табл. 20.12. Разработан также кабель марки МВДТ с сечением жил 1200 мм^2 на напряжение 220 кВ. Более подробные сведения о кабелях приведены в [20.1].

20.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Электрическое сопротивление токопроводящей жилы постоянному току, Ом/км, при температуре T, °С

$$R_t = \frac{\rho_{20}}{q}\left[1+\alpha\left(T-20\right)\right],$$

где q — номинальное сечение жилы, мм^2; ρ_{20} — удельное сопротивление при температуре 20 °С, нОм·м; α — температурный коэффициент сопротивления, равный для меди и алюминия приблизительно 0,004 °С$^{-1}$.

С учетом скрутки и нагартовки проволок в жиле ρ_{20} не должно превышать для меди и алюминия: при сечении жил до 500 мм^2 — 17,76 и 29,11 нОм·м, при сечении жил свыше 500 мм^2 — 17,93 и 29,4 нОм·м.

При расчете сопротивления жилы переменному току сопротивление жилы постоянному току следует умножить на коэффициент, приведенный в табл. 20.13 для меди. Для алюминиевых жил этот коэффициент несколько меньше. Для уменьшения сопротивления жил переменному току при больших сечениях жилы сечением 625 мм^2 и более изготовляются секционированными.

Индуктивность кабеля при симметричной нагрузке фаз в трехфазной системе при расположении жил по углам равностороннего треугольника может быть вычислена по формуле, мГн/км

$$L = L_1 + A\lg(s/r),$$

где s — расстояние между центрами жил; r — радиус круглой токопроводящей жилы, а для кабелей с секторными жилами — радиус круглой жилы, эквивалентной по сечению секторной (приближенно);

Таблица 20.13. Значение коэффициента возрастания сопротивления при переменном токе для медных жил

Сечение жилы, мм^2	Трехжильные кабели с поясной изоляцией	Три одножильных кабеля, расположенных вплотную по вершинам треугольника
150	1,01	1,006
186	1,02	1,008
240	1,035	1,0105
300	1,052	1,025
400	1,095	1,05
500	1,15	1,08
625	—	1,125
800	—	1,20
1000	—	1,29

Таблица 20.14. Коэффициент L_1 для расчета индуктивности кабелей

Число проволок в жиле	Одножильные кабели	Трехжильные кабели
3	0,0750	0,0766
7	0,0638	0,0650
10	0,0556	0,0567
37	0,0531	0,0543
61	0,0525	0,0535
Более 61	0,0502	0,0513

A = 0,463 и 0,471 для одио- и трехжильных (с секторными жилами) кабелей соответственно. Значения коэффициентов L_1 приведены в табл. 20.14.

Значения активного и индуктивного сопротивлений кабелей с поясной изоляцией на напряжение 6 и 10 кВ приведены в табл. 20.15.

Емкость кабеля с экранированными фазами или с отдельно освинцованными жилами, Ф/м, вычисляется по формуле

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\ln(R/r)},$$

где R — радиус по изоляции; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции (для бумажной изоляции ε_r = = 3,3÷3,7).

Таблица 20.15. Активное и индуктивное сопротивления трехжильных кабелей с поясной изоляцией

Сечение, мм^2	Активное сопротивление, Ом/км, при 20 °С		Индуктивное сопротивление, Ом/км, при напряжении	
	Алюминий	Медь	6 кВ	10 кВ
1,5	19,62	11,95	—	—
2,5	11,75	7,17	—	—
4	7,85	4,5	—	—
6	4,90	3,0	—	—
10	2,94	1,79	0,11	0,122
16	1,84	1,12	0,102	0,113
25	1,17	0,716	0,091	0,099
35	0,84	0,514	0,087	0,095
50	0,589	0,359	0,083	0,090
70	0,42	0,256	0,08	0,086
95	0,31	0,189	0,078	0,083
120	0,245	0,15	0,076	0,081
150	0,196	0,12	0,074	0,079
185	0,159	0,097	0,073	0,077
240	0,125	0,075	0,071	0,075

Емкостный ток в трехфазном кабеле при симметричном напряжении определяется емкостью $C_р$:

$$I_C = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \omega C_р l,$$

где $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение; ω — угловая частота (314 рад/с); l — длина линии.

Для кабелей, изготовляемых по ГОСТ 18410-73, справедливы приближенные соотношения C_1 = = 0,865$C_р$; C_2 = 1,68$C_р$, где C_1 — емкость одной жилы по отношению к двум другим, соединенным с металлической оболочкой; C_2 — емкость трех жил, соединенных вместе, по отношению к свинцовой оболочке.

Ток замыкания на землю при заземлении одной фазы кабельной сети в системе с изолированной нейтралью

$$I_з = U_{ном} \omega \cdot 0{,}41 C_р l/\sqrt{3}.$$

Таблица 20.16. Рабочая емкость $C_р$, мкФ/км, трехжильных кабелей с поясной изоляцией в трехфазных цепях с симметричным напряжением

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм^2										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
1	0,35	0,4	0,5	0,53	0,63	0,72	0,77	0,81	0,86	0,87	—
6	0,2	0,23	0,28	0,31	0,36	0,4	0,42	0,46	0,51	0,53	0,58
10	—	—	0,26	0,27	0,29	0,31	0,35	0,37	0,44	0,45	0,46

Таблица 20.17. Емкость, мкФ/км, одножильных кабелей и фазы трехжильных кабелей с отдельно освинцованными жилами с бумажной изоляцией

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм^2										
	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
20	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,32	0,35	0,38	0,42	0,46	0,51
35	—	—	—	0,18	0,20	0,24	0,26	0,28	0,31	0,33	—

Таблица 20.18. Емкость фазы маслонаполненных кабелей

Тип кабеля	Напряжение, кВ	Сечение, мм^2	Толщина изоляции, мм	Емкость, мкФ/км
Маслонаполненный с центральным маслопроводящим каналом	110	150	11,0	0,25
		270	10,0	0,33
		625	9,6	0,45
	220	350	20,0	0,22
		500	18,8	0,27
		625	18,0	0,28
Маслонаполненный для затягивания в стальной трубопровод	110	270	10,7	0,30
		425	10,0	0,37
		700	9,6	0,46
	220	300	20,7	0,20
		550	18,1	0,28
		700	17,5	0,29
	380	550	26	0,21
	525	625	30	0,19

Значения емкостей для различных конструкций кабеля с бумажной пропитанной изоляцией и маслонаполненных приведены в табл. 20.16—20.18.

20.10. СПОСОБЫ ПРОКЛАДКИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Области применения силовых кабелей различных конструкций устанавливаются в зависимости от агрессивности и пожароопасности окружающей среды, механических условий при монтаже и эксплуатации. При определении областей применения кабелей учитываются требования ПУЭ, Строительных норм и правил (СНиП).

Применение кабелей с медными жилами предусмотрено только для специальных целей, например во взрывоопасных помещениях, в шахтах, опасных по газу и пыли. Предусматривается также широкое использование кабелей в алюминиевой оболочке и кабелей с пластмассовой изоляцией взамен кабелей в свинцовой оболочке. Применение кабелей в свинцовой оболочке предусмотрено лишь для подводной прокладки, прокладки в угольных и сланцевых шахтах, в особо опасных коррозионно-активных средах. В остальных случаях выбор кабелей в свинцовой оболочке подлежит специальному техническому обоснованию.

При наличии опасности механических повреждений следует применять кабели с ленточной броней, а при наличии продольных растягивающих усилий — с броней из круглых проволок. В сильно агрессивной среде в грунте и трубах следует применять кабели с усиленными защитными антикоррозионными покровами (л, 2л, в — см. табл. 20.6). Методы определения показателей активности сред определены в ГОСТ 9.015-74 "Единая система защиты от коррозии и старения. Подземные сооружения. Общие технические требования".

Наименьшие радиусы изгиба кабелей при прокладке приведены в табл. 20.19

При прокладке кабелей с бумажной пропитанной изоляцией разность уровней между высшей и низшей точками по трассе должна быть не более указанной в табл. 20.20. Разность уровней для кабелей с пластмассовой, резиновой и бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, не ограничивается. Допустимые усилия тяжения при прокладке кабелей приведены в табл. 20.21 и 20.22.

Таблица 20.19. Наименьшие допустимые радиусы изгиба силовых кабелей и изолированных жил

Тип и конструкция кабеля	Кратность радиуса внутренней кривой изгиба	
	кабеля по отношению к его наружному диаметру	жилы по отношению к ее диаметру в изоляции
Кабели одножильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели многожильные в свинцовой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	15	10
Кабели многожильные в алюминиевой оболочке с бумажной изоляцией бронированные и небронированные	25	10
Кабели с резиновой изоляцией:		
небронированные	10	3
бронированные	15	3
Кабели с пластмассовой изоляцией:		
в пластмассовой оболочке, не имеющие брони и без стальной гофрированной или алюминиевой оболочки	6	3
бронированные, не имеющие брони без стальной гофрированной оболочки	10	3

При прокладке одножильных кабелей в сетях переменного тока должны применяться небронированные кабели, при этом должно соблюдаться указанное в проекте их взаимное расположение.

В табл. 20.23÷20.25 приведены рекомендации по применению кабелей в соответствии с "Едиными техническими указаниями по выбору и применению электрических кабелей" (от 11 мая 1978 г.).

При прокладке кабеля марки МВДТ соблюдаются следующие условия: число изгибов стального трубопровода между двумя колодцами 2÷3 м; минимальный радиус изгиба стального трубопровода на участке между муфтами 8 м; минимальный радиус изгиба медной трубы в разветвительной муфте 2 м; максимальное расстояние между двумя колодцами (соединительными муфтами) при протягивании кабелей, армированных двумя проволоками скольжения 400÷600 м, а при протягивании в сплошной проволочной броне 1200 м.

Таблица 20.20. **Максимально допустимые разности уровней без применения стопориых муфт (по ГОСТ 18410-73)**

Напряжение, кВ	Изоляция	Кабели	Разность уровней, м (не более)
1	С вязкой пропиткой	Небронированные: в алюминиевой оболочке	25
		в свинцовой оболочке	20
	Обедненно-пропитанная	Бронированные В алюминиевой оболочке	Без ограничения при условии промежуточных креплений
		В свинцовой оболочке	100
6	С вязкой пропиткой	В алюминиевой оболочке	20
		В свинцовой оболочке	15
	Нестекающая	В алюминиевой или свинцовой оболочке	Без ограиичения
	Обеднеино-пропитаниая		100
10	С вязкой пропиткой		15
	Нестекающая		Без ограничения
20 и 35	С вязкой пропиткой		15
	Нестекающая		Без ограничения

Таблица 20.21. **Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение 35 кВ марки ОСБ**

Сечение кабеля, мм^2	Допустимые усилия тяжения за жилы, кН
3×70	8,2
3×95	10,8
3×120	13,7
3×150	17,6

Таблица 20.22. **Допустимые усилия тяжения для кабелей на напряжение до 10 кВ**

Сечение жил кабеля, мм^2	Допустимые усилия тяжения, кН					
	Тяжение за алюминиевую оболочку			Тяжение за жилы		
	1 кВ	6 кВ	10 кВ	медные	многопроволочные алюминиевые	однопроволочные алюминиевые
3×240	7,4	9,3	9,8	35	27,4	13,7
3×185	6,4	7,4	8,3	26	21,6	10,8
3×150	5,9	6,4	7,4	22	17,6	8,8
3×120	3,9	4,9	6,4	17,6	13,7	6,9
3×95	3,4	4,4	5,7	13,7	10,8	5,4
3×70	2,9	3,9	4,9	10,0	8,2	3,9
3×50	2,3	3,4	4,4	7,0	5,9	3,9
3×85	1,8	2,9	3,9	4,9	3,4	3,4
3×25	1,7	2,8	3,7	3,4	2,9	2,9

Примечание. Однопроволочные жилы сечением более 70 мм^2 выполнены из мягкого алюминия, относительное удлииение жилы не менее 30%.

20.11. ДОПУСТИМЫЕ ТОКИ НАГРУЗКИ

В соответствии с ПЭУ при длительном времени работы при максимальном токе нагрузка кабелей выбирается исходя из экономической плотности тока. Кроме того, ток нагрузки выбирается исходя из максимально допустимой температуры в кабеле. Температура жил кабелей не должна превышать значений, представленных в табл. 20.26. Увеличение температуры выше этих норм приводит к ускоренному старению изоляции, что сопровождается ухудшением электрических свойств.

При прокладке нескольких кабелей они нагревают друг друга и тепловой расчет определяется взаимным расположением кабелей. Подробно о тепловом расчете см. в [20.2]. Таблицы допустимых токов нагрузки приведены в [20.1]. Приближенно допустимый ток нагрузки силовых кабелей вычисляется по формуле

$$\lg I = a_0 + a_1 \lg Q,$$

где Q — сечение медной жилы, мм^2; I — ток нагрузкн, А; a_0 и a_1 — коэффициенты, приведенные в табл. 20.27.

Коэффициент увеличения тока при кратковременных перегрузках приведен в табл. 20.28. А в табл. 20.29 и 20.30 приведены допустимые токи нагрузки в маслонаполненных кабелях и кабелях марки МВДТ.

Если монтаж кабелей выполнен на лотках плотной группой, то допустимый ток нагрузки должен быть умножен на снижающий коэффициент:

$$k_{гр} = A\left[\left(1+\lg\frac{n}{m}\right)\left(1+2{,}3\lg m\right)\right]^{-1/2},$$

где n — общее число кабелей в группе; m — число слоев в группе.

Таблица 20.23. Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в земле (траншеях)

Область применения	Кабель прокладывается на трассе	Тип и марки кабелей		
		с бумажной пропитанной изоляцией		с пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой
		В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации подвергается значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации не подвергается растягивающим усилиям
В земле (траншеях) с низкой коррозионной активностью	Без блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, АСБ, ААл	ААПл, АСПл	ААВГ[1], АПсВГ[1]
	С наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, АСБ	ААП2л, АСПл	
В земле (траншеях) со средней коррозионной активностью	Без блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2л, АСБ, АСБл, ААл	ААПл, АСП	АПвВГ[1], АПВГ[1], АВВБ, АПВБ, АПсВБ, АППБ, АПвВБ, АПБбШв, АПвБбШв, АВВбШв, АПсБбШв, АПАШв, АПАШп, АВАШв, АПсАШв, АВРБ, АНРБ, АВАБл, АПАБл
	С наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБ2л, ААБв, АСБл, АСБ2л	ААП2л, АСПл	
В земле (траншеях) с высокой коррозионной активностью	Без блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБ2л, АСП2л, ААП2лШв, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБв, АСБл, АСБ2л		
	С наличием блуждающих токов	ААШп, ААБв, АСБ2л, АСБ2лШв	ААП2лШв, АСП2л	

[1] Кабели на номинальное напряжение до 1,0 кВ включительно. Кабели с пластмассовой изоляцией в алюминиевой оболочке не следует применять на трассах с наличием блуждающих токов в грунтах с высокой коррозионной активностью.

Таблица 20.24. Марки кабелей, рекомендуемых для прокладки в воздухе

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
Прокладка в помещениях, туннелях, в каналах, кабельных полуэтажах, шахтах, коллекторах, производственных помещениях и др.:				
а) сухих	ААГ, ААШв	ААБлГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПвВГ[2], АПВГ[2], АПвсВГ, АПсВГ	АВРБГ, АВбШв, АПАШв, АВАШв, АПвБбШв[2], АПвсБбШв, АПсВБГ, АНРБГ
б) сырых, частично затапливаемых при наличии среды со слабой коррозионной активностью	ААШв	ААБлГ		
в) сырых, частично затапливаемых при наличии среды со средней коррозионной активностью	ААШв, АСШв	ААБвГ, ААБ2лШв, ААБлГ, АСБлГ, АСБ2лГ, АСБ2лШв[1]		
Прокладка в пожароопасных помещениях	ААГ, ААШв	ААБвГ, ААБлГ, АСБлГ	АВВГ, АВРГ, АПсВГ, АНРГ, АСРГ, АПвсВГ	АВБбШв, АПсБбШв, АПвсБГ, АВРБГ, АСРБГ
Прокладка во взрывоопасных зонах классов:				
а) В-I, В-Ia	СБГ, СБШв	—	ВВГ[3], ВРГ[3], НРГ[3], СРГ[3]	ВБВ, ВБбШв, НРБГ, СРБГ
б) В-Iг, В-II	ААШв, ААБлГ, АСБГ	—	АВВГ, АВРГ, АНРГ	АВБВ, АВБбШв
в) В-Iб, В-IIа	ААГ, АСГ, АСШв, ААШв	ААБлГ, АСБГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АСРГ	ААНРГ, АСРБГ, АВРБГ

Окончание табл. 20.24

Область применения	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		С пластмассовой и резиновой изоляцией и оболочкой	
	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации	при отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	при наличии опасности механических повреждений в эксплуатации
Прокладка на эстакадах: а) технологических	ААШв	ААБлГ, ААБвГ[4], ААБ2лШв, АСБлГ	—	АВРБГ, АНРБГ, АПсВБГ, АПвсВГ, АВАШв
б) специальных кабельных	ААШв, ААБлГ, ААБвГ, АсБлГ	—	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПсВГ, АПвВГ, АПВГ, АПвсВГ, АПАШв	АВРБГ, АНРБГ, АВАШв, АПсВБГ
в) по мостам	ААШв[5]	ААБлГ		
Прокладка в блоках	СГ, АСГ		АВВГ, АПсВГ, АПвВГ, АПВГ	

[1] Кабель марки АСБ2лШв может быть использован в исключительно редких случаях с особым обоснованием.
[2] Для одиночных кабельных линий, прокладываемых в помещениях.
[3] Для групповых осветительных сетей во взрывоопасных зонах класса В-Iа.
[4] Применяются при наличии химически активной среды.
[5] Прокладка в коробках или при обеспечении защиты от механических повреждений в эксплуатации.

Таблица 20.25. **Марки кабелей, рекомендуемые для прокладки в воде и шахтах**

Условия прокладки	С бумажной пропитанной изоляцией в металлической оболочке		
	При отсутствии опасности механических повреждений в эксплуатации	В процессе эксплуатации не подвергаются значительным растягивающим усилиям	В процессе эксплуатации подвергаются значительным растягивающим усилиям
В воде	—	—	СКл, АСКл, ОСК, АОСК
В шахтах	СШв, ААШв[1]	СБн, СБлн, СБШв, ААШв[1]	СПлн, СПШв, СПл

[1] Кабель марки ААШв следует применять в подземных рудных и нерудных выработках, неопасных по газу и пыли.

Таблица 20.26. **Допустимые температуры нагрева изоляции силовых кабелей при различных режимах работы**

Тип кабеля	Напряжение, кВ	Допустимая температура, °С		
		Длительно	Кратковременно при аварийном состоянии сети	При прохождении тока короткого замыкания при расчете нагрева по выдержке основной защиты
С бумажной изоляцией	1 6 10	80 80 70	—	200
С обедненно-пропитанной изоляцией	1 6	80 80	95 (10% перегрузка в течение 2 ч)	200
С резиновой изоляцией	—	70	110 при пусковых режимах	200
С изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида, из вулканизированного ПЭ	1÷35	70 90	80 130	130 для полиэтилена (ПЭ) 160 для поливинилхлорида (ПВХ) 250 для сшитого полиэтилена (ВПЭ)
Маслонаполненные и в стальных трубах при прокладке в воздухе	110	80	80 при продолжительности непрерывной работы 100 ч. В течение года общая продолжительность не более 500 ч. Интервал между перегрузками не менее 10 сут	125 (по выдержке резервной защиты)
В остальных случаях	110 500	70		

Таблица 20.27. Коэффициенты для вычисления тока нагрузки силовых кабелей

Кабели	Число жил	Напряжение, кВ	Прокладка					
			в воздухе		в земле		в воде	
			a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0
С бумажной пропитаной изоляцией	1*	1	0,63	1,30	0,57	1,455	0,57	1,57
	3; 4**	1	0,62	1,24	0,58	1,31	0,58	1,42
	3	6	0,61	1,26	0,58	1,305	0,58	1,415
	3	10	0,61	1,20	0,57	1,29	0,57	1,40
То же с отдельными металлическими оболочками	3	20	0,57	1,28	0,52	1,28	0,52	1,32
	3	35	0,54	1,325	0,49	1,41	0,49	1,45
С пластмассовой изоляцией и изоляцией из ВПЭ***	3	6	0,62	1,185	0,58	1,265	0,58	1,38
С пластмассовой, резиновой*** и ВПЭ*** изоляцией	1*	До 1	0,64	1,32	0,55	1,40	0,55	1,51
	2		0,61	1,27	0,55	1,42	0,55	1,53
	3; 4**		0,63	1,19	0,575	1,30	0,575	1,41

* Коэффициенты нагрузки даны для работы при постоянном токе.

** Для четырехжильных кабелей с нулевой жилой меньшего сечения. При других нулевых жилах ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент 0,93.

*** Для определения токовых нагрузок кабелей с резиновой изоляцией при прокладке в воздухе и в земле данные нагрузки должны быть соответственно умножены на коэффициент 0,95 и 0,96, а кабелей с изоляцией из вулканизированного полиэтилена — на коэффициенты 1,16 и 1,13.

Таблица 20.28. Допустимая кратковременная перегрузка кабелей на напряжение до 10 кВ

Предварительная нагрузка кабелей, %	Длительность перегрузки, мин	Сечение жилы, мм²		
		50÷95	120÷240	300÷800
		Коэффициент перегрузки		
0	30	1,15	1,25	1,45
	60	—	1,10	1,20
50 номинальной	30	1,10	1,20	1,40
	60	1,05	1,05	1,15
70 номинальной	30	1,05	1,15	1,30
	60	—	1,05	1,10

Коэффициент $A = 1$ для небронированных кабелей, а для бронированных соответственно при однослойной, двухслойной и трехслойной прокладке $A = 1{,}08$; 1,15; 1,2.

Температура окружающей среды при прокладке в грунте принимается равной 15 °С, в воздухе 25 °С и в туннелях 35 °С.

Применение искусственного охлаждения позволяет повысить допустимый ток нагрузки. При прокладке рядом с кабелями в грунте труб с охлаждающей водой ток можно увеличить на 10÷20%. При прокачивании хладагента (масло, вода, ожиженные газы) по каналу внутри жилы возможно значительное увеличение тока нагрузки. При изменении температуры окружающей среды или максимально допустимой температуры кабеля допустимый ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент

$$k_{ср} = \sqrt{(T_м - T_{02})/(T_м - T_{01})},$$

где $T_м$ — максимально допустимая температура жилы; T_{01} — расчетная температура окружающей среды; T_{02} — измененная температура окружающей среды, для которой необходимо пересчитать ток нагрузки.

Таблица 20.29. Длительно допустимые расчетные нагрузки на маслонаполненные кабельные линии среднего давления из трех одножильных маслонаполненных кабелей МНСА с медной жилой при прокладке в воздухе с расчетной температурой 25 °С и в земле с расчетной температурой 15 °С

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм²	Допустимые нагрузки, А		
		Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
			Одноцепные линии	Двухцепные линии
110	150	450	380	330
	270	620	510	445
	350	710	570	500
	500	860	660	575
	700	1010	750	640
220	270	540	440	390
	350	615	500	430
	500	785	590	500
	700	860	650	545

Примечание. Для кабелей со стальной проволочной броней марки МНСК при механизированной прокладке допустимый ток меньше на 6%. Бронепокровы фаз, как и свинцовые оболочки, соединяются и заземляются с двух сторон.

В табл. 20.29 и 20.30 приводятся допустимые токи нагрузки только для кабелей с медными жилами. Свинцовые оболочки соединены и заземлены с двух сторон. Кабели проложены по треугольнику. Для кабелей с алюминиевыми жилами ток нагрузки должен быть умножен на коэффициент 0,77. При вычислении токов использованы температуры, приведенные в табл. 20.26. Ток нагрузки для кабелей, проложенных в грунте, рассчитан исходя из

Таблица 20.30. Длительно допустимые расчетные нагрузки на кабельные линии в стальном трубопроводе с маслом под давлением (кабели с медными жилами) при прокладке в земле с расчетной температурой 15 °С и в воздухе с расчетной температурой 25 °С

а) одноцепные и двухцепные линии 110 и 220 кВ

Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм^2	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозионным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А			Напряжение, кВ	Сечение жилы, мм^2	Внешний диаметр трубопровода с антикоррозионным покрытием, мм	Допустимые нагрузки, А		
			Прокладка в воздухе	Прокладка в земле					Прокладка в воздухе	Прокладка в земле	
				Одноцепные линии	Двухцепные линии					Одноцепные линии	Двухцепные линии
110	150	144	420	330	300	220	270	211	520	425	380
	270	159	590	450	395		400	239	630	495	450
	400	186	735	540	475		550	239	730	555	500
	550	186	860	615	540		800	239	830	615	540
	800	211	980	670	585						

Продолжение табл. 20.30

б) одноцепные линии 380 и 525 кВ*

Напряжение, кВ	Сечение токопроводящей жилы, мм^2	Допустимые нагрузки, А; прокладка в земле			Допустимые нагрузки, А; прокладка в воздухе			
		Естественное охлаждение	Искусственное охлаждение при длине секции, м		Без вентиляции	С вентиляцией (скорость воздуха 1,5÷2 м/с)	Без вентиляции, но с искусственным охлаждением при длине секции, м	
			300	1000			300	1000
380	550	490	860	750	690	750	870	785
	700	520	975	835	750	830	970	880
	1000	550	1140	980	880	980	1140	1035
	1500	575	1325	1130	990	1100	1340	1200
525	500	435	820	710	650	710	830	742
	700	460	940	820	730	800	950	856
	1000	490	1105	960	800	930	1120	1005
	1500	490	1280	1105	950	1060	1300	1165

* Продольная циркуляция масла в трубопроводе и охлаждение масла в теплообменниках. Температура входящего масла 25 °С, скорость масла в трубопроводе 10 см/с, расход масла 10 м^3/ч.

удельного термического сопротивления грунта 1,2 °С·м/Вт.

Если допустимая температура жилы изменилась с $T_{м1}$ до $T_{м2}$, то допустимый ток нагрузки необходимо умножить на коэффициент $k_м$, вычисляемый по формуле

$$k_м = \sqrt{\frac{(T_{м2}-T_0)[1+\alpha(T_{м1}-20)]}{(T_{м1}-T_0)[1+\alpha(T_{м2}-20)]}},$$

где $\alpha \approx 0{,}004$ °С$^{-1}$ для меди и алюминия.

При прокладке одиночного кабеля в бетонном блоке ток иагрузки кабеля, рекомеидуемый при прокладке в грунте, следует умножить на коэффициент 0,7. Если в блоке проложеио четыре кабеля, то этот коэффициеит уменьшается до 0,6. Если в блоке проложено 10 кабелей или более, коэффициент уменьшается до 0,4. Более подробно о прокладке в блоках см. [20.1].

20.12. АРМАТУРА СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Кабельная арматура предназначена для соединения строительных длин кабеля, а также для оконцевания кабельных линий. В зависимости от назначения кабельную арматуру можно разделить на следующие основные группы:

1) соединительные муфты и их разновидностн (ответвительные, соединительно-разветвительные) — арматура для соединения отдельных строительных длин кабелей;

2) стопорные муфты — арматура для соединения строительных длин и одновременного секционирования кабельных линий с целью предотвращеиия перетекання масла или пропиточного состава из секции в секцию;

3) концевые муфты и концевые заделки — арматура для оконцевания кабелей на открытом воздухе и внутри помещений.

Кроме кабельной арматуры в данном параграфе будет рассмотрена аппаратура для поддержания в заданных пределах давления масла в маслоиаполненных кабельиых лииниях.

Общие технические требования на кабельную арматуру напряжением 1÷35 кВ представлены в ГОСТ 13781.0.-86, а на кабельную арматуру напряжением 110÷500 кВ — в ТУ 16.К71.70-89. Типы муфт имеют соответствующие обозначения (табл. 20.31 и 20.32).

Муфты типов С и СП могут иметь защитные кожухи трех типов:

Таблица 20.31. **Обозначения основных типов муфт напряжением 1÷35 кВ**

Обозначение типа	Наименование муфты	Область применения	Номера ГОСТ или технических условий на муфты
С	Муфта соединительная	Соединение кабелей	ГОСТ13781.2-77 ТУ 16.К09.051-91 ТУ 16.К71.071-90 ТУ 16.538.397-83 ТУ 16.К71-071-89 ТУ 36-473-86
СП	Муфта соединительная переходная	Для соединения кабелей с пластмассовой изоляцией с кабелями с бумажной изоляцией	ТУ 16-687.035-87
КН	Муфта концевая наружной установки	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе	ТУ 16.К09.051-91 ТУ 16.К09.046-90 ТУ 16.К71-085-90 ТУ 16.К71-086-90 ТУ 16.687.019-85
КМ	Муфта концевая мачтовая	Для оконцевания кабелей на открытом воздухе при переходе на воздушную линию электропередачи	ТУ 16.К09.046-90
КВ	Муфта концевая внутренней установки	Для оконцевания кабелей внутри помещений	ТУ 16.К71.085-90 ТУ 16.538.141-77 ТУ 16.538.284-83

Таблица 20.32. **Основные марки и область применения муфт для кабелей на напряжение 110÷500 кВ**

Марка	Наименование муфты; номер технических условий	Область применения	Напряжение, кВ
МКМН	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля низкого давления; ТУ 16.К71-70-89	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям	110, 150, 220
МСМН	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля низкого давления; ТУ 16.К71-70-89	Для соединения отдельных строительных длин кабеля	110, 150, 220
МСМНИ	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля низкого давления изолирующая; ТУ 16.К71-70-89	Для соединения строительных длин кабеля и разделения их оболочек	110
МСТМНЭ	Муфта стопорная для маслонаполненного кабеля низкого давления; ТУ 16.538.332-78	Для соединения строительных длин кабеля с разделением их масляного питания	110
КМВДТ	Муфта концевая для маслонаполненного кабеля высокого давления; ТУ 16.538.356-80	Для присоединения кабельных линий к электрическим аппаратам или воздушным линиям	110÷500
СМВДТ	Муфта соединительная для маслонаполненного кабеля высокого давления; ТУ 16.538.356-80	Для соединения отдельных строительных длин кабеля	110÷500
СРМВДТ	Муфта соединительно-разветвительная для маслонаполненного кабеля высокого давления; ТУ 16.538.356-80	Для соединения отдельных строительных длин кабеля с кабелем разводки фаз от магистрального трубопровода к концевым муфтам	110÷500
ВКРЭ	Ввод кабельный в комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией; ТУ 16.538.338-82, ТУ 16.686.012-85	Для присоединения кабельной линии к элегазовому распределительному устройству	110
КТНДУ	Ввод кабельный унифицированный в трансформатор; ТУ 16.538.210-73	Для присоединения кабельной линии к трансформатору	110
МКАПв	Муфта концевая для кабеля с алюминиевой жилой и пластмассовой изоляцией; ТУ 16.538.381-81	Для присоединения кабельной линии к электрическим аппаратам или воздушным линиям	110
МСАПв	Муфта соединительная для кабеля с алюминиевой жилой и пластмассовой изоляцией; ТУ 16.538.381-81	Для соединения отдельных строительных длин кабеля	110

К — защитный кожух для муфт, проложенных в помещении или в специальных сооружениях;

$К_з$ — защитный кожух для муфт, проложенных в земле;

$К_в$ — защитный кожух для муфт, проложенных под водой.

В условное обозначение муфты входят буквы и цифры, обозначающие элементы конструкции, материал и др.

Материал корпуса муфты и кожуха имеет буквенное обозначение, например: Ч — чугун, С — свинец, Л — латунь, Ст — сталь, П — пластмасса, Э — эпоксидный компаунд и др. Конструктивные особенности исполнения могут иметь следующее обозначение: О — однофазная муфта, Т — тропическое исполнение и т.д. Далее указывается количество фаз и сечение жил кабеля, напряжение и номер соответствующего ГОСТ или технического условия на муфту. Пример условного обозначения соединительной свинцовой муфты в защитном подземном чугунном кожухе для кабеля сечением жил 3×120 мм^2 на напряжение 10 кВ: муфта СС-100-$К_з$Ч-75-3×120-10 ГОСТ 13781.2-77. Цифры 100 и 75 означают радиальный размер в миллиметрах, свинцового и чугунного корпуса и кожуха. Муфты для силовых кабелей с пластмассовой изоляцией в условном обозначении имеют еще буквы, обозначающие изоляцию кабеля (П — полиэтилен и поливинилхлорид, Пв — вулканизированный полиэтилен) и материал изоляции муфты (Э — эпоксидная, сл и слт — на основе самосклеивающихся лент и термоусаживаемых трубок, эл — эластомерная и т.д.).

Пример условного обозначения соединительной муфты на основе самосклеивающихся лент и термоусаживаемых трубок с защитным подземным пластмассовым кожухом для кабеля с изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида сечением жил 3×120 мм^2 на напряжение 6 кВ: муфта ПСслт-$К_з$П-75-3×120-6 ТУ 16.538.397-83.

Муфты, приведенные в табл. 20.32, предназначены для маслонаполненных кабелей сечением жил от 120 до 1200 мм^2, а также для кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Кроме основных марок могут использоваться их модификации, в конструкцию которых внесены изменения, связанные с видом климатического исполнения. Кроме нормального исполнения (см. табл. 20.32) возможны также исполнения для сетей, эксплуатируемых в районах с холодным климатом (ХЛ), например марки МКМН-ХЛ и т.п., а также для тропиков (Т), например МКМН-Т и т.п.

Для маслонаполненных кабелей низкого давления на напряжение 10 кВ возможно использование малогабаритных конструкций (М), например МКМН-М, МКМН-М-ХЛ и т.п.

В условное обозначение муфт для маслонаполненных кабелей должны входить: марка муфты, цифра, указывающая напряжение, сечение жилы кабеля, обозначение стандарта. Пример условного обозначения: МКМН 110 500 ТУ 16.К71-70-89 — муфта концевая для маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 10 кВ сечением жилы 500 мм^2 по ТУ 16.К71-70-89.

Для соединения отдельных строительных длин силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 1÷35 кВ могут применяться как муфты в металлическом корпусе с заливкой либо битуминозной массой, либо маслоканифольной заливочной массой, так и эпоксидные муфты. Последние менее пожароопасны по сравнению с металлическими.

Конструкция металлических муфт зависит от напряжения. Для соединения кабелей на напряжение 1 кВ применяются соединительные чугунные муфты типа СЧ или СЧм, для кабелей на напряжение 6 и 10 кВ — свинцовые муфты типа СС (рис. 20.7) или алюминиевые типа СА. Более современную конструкцию имеют муфты марки ССсл, в которых бумажная подмотка заменена на изоляцию из самосклеивающихся лент. Свинцовые и алюминиевые муфты при прокладке в земле защищаются от механических повреждений защитными кожухами из чугуна типа $К_з$Ч, $К_з$Чг (герметичное исполнение) или из стеклопластика $К_з$П. Защита алюминиевого корпуса муфты от коррозии осуществляется дополнительными наружными подмотками и термоусаживаемыми трубками.

Для соединения кабелей на напряжение 20 и 35 кВ применяются латунные и свинцовые однофазные муфты типов СЛО или ССО (рис. 20.8). При прокладке в земле для защиты от механических повреждений и коррозии три однофазные муфты помещаются в общий металлический кожух (чугунный или стальной или кожух из стеклопластика).

Основные габаритные размеры металлических соединительных муфт приведены в табл. 20.33.

Эпоксидные соединительные муфты типа СЭ применяются для соединения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 110 кВ на горизонтальных участках трассы и при прокладке кабелей на наклонных трассах с разностью уровней между высшей и низшей точками, превышающей допустимое значение. В этом случае они играют

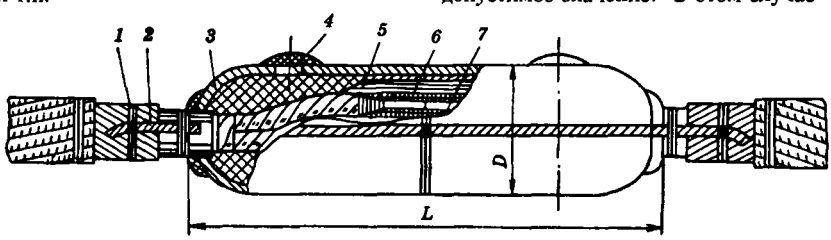


Рис. 20.7. Свинцовая соединительная муфта типа СС для кабелей на напряжение 6÷10 кВ

1 — бандаж; *2* — провод заземления; *3* — корпус муфты; *4* — заливочное отверстие; *5* — подмотка рулонами; *6* — подмотка роликами; *7* — соединительная гильза

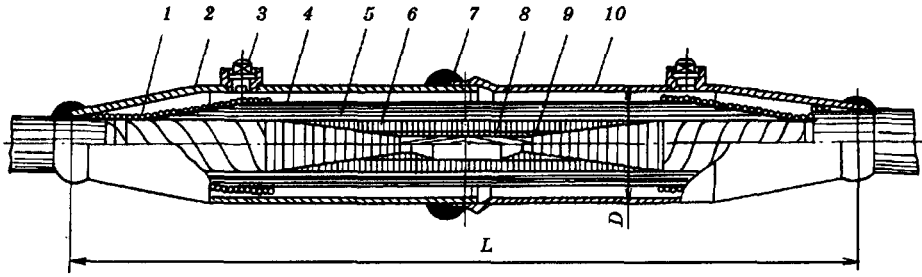


Рис. 20.8. Соединительная латунная муфта типа СЛО на напряжение 20 и 35 кВ

1 — экран из свинцовой проволоки; *2* — полумуфта левая; *3* — пробка; *4* — экран из металлизированной бумаги; *5* — подмотка трапецеидальными рулонами; *6* — подмотка роликами шириной 10 мм; *7* — пайка; *8* — гильза; *9* — подмотка ролнками шириной 5 мм; *10* — полумуфта правая

Таблица 20.33. Типы и основные размеры металлических муфт* для кабелей на напряжение 1÷35 кВ (см. рис. 20.7 и 20.8)

Тип муфты	Сечение жил кабеля на напряжение, кВ				Размеры, мм	
	6	10	20	35	Муфты $L \times D$	Защитного кожуха $L \times D$
СС-60 СС-70	10, 16, 25 35, 50, 70	— До 25	— —	— —	450×60 474×70	750×108
СС-80 СС-90	95, 120 150	35, 50, 70 95, 120	— —	— —	525×80 550×90	840×130
СС-100 СС-110	185, 240 —	150 185, 240	— —	— —	600×100 890×110	1000×149
СЛО-20; ССО-20 СЛО-35; ССО-35	— —	— —	25÷185 —	120÷300	640×65 740×80	1775×246 2000×276

* Размеры муфт типа ССсл, а также алюминиевых муфт для кабелей 6÷10 кВ незначительно отличаются от размеров свинцовых муфт, размеры защитных кожухов такие же, как у соответствующих им по диаметру свинцовых муфт.

роль стопорных муфт. Корпуса соединительных муфт на напряжение 6÷10 кВ отливаются на заводе: муфты типа СЭ или СЭв с поперечным и продольным разъемом (рис. 20.9). Корпуса муфт на 1 кВ типа СЭс отливаются непосредственно при монтаже в съемные металлические или пластмассовые формы. Соединительные муфты типа СЭ или СЭв имеют ряд преимуществ по сравнению с муфтами типа СЭс, а именно: корпус муфты, отлитый в заводских условиях, имеет более высокие электрические свойства, кроме того, уменьшается количество эпоксидного компаунда, заливаемого в муфту при монтаже. В связи с этим муфты типа СЭс применяются только для кабелей напряжением 1 кВ, а муфты типа СЭ или СЭв — для кабелей на 6 и 10 кВ. Для кабелей с однопроволочными жилами на напряжение до 1 кВ находят применение малогабаритные муфты с корпусами из эпоксидного компаунда (рис. 20.10) типа СЭм. Соединение жил в этой муфте производится холодной сваркой. Размеры эпоксидных соединительных муфт приведены в табл. 20.34.

Для соединения кабелей марки ОСБ на 20 и 35 кВ, а также в качестве стопорных муфт для этих же кабелей при их прокладке по наклонной трассе наряду с латунными однофазными муфтами могут также применяться эпоксидные однофазные муфты типа СЭО.

Соединение трехжильных кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 10 кВ производится с помощью муфт из самосклеивающихся лент — муфты типа ПСслт (рис. 20.11, *а*). При отсутствии

Таблица 20.34. Размеры эпоксидных соединительных муфт для трехжильных кабелей (см. рис. 20.9 и 20.10)

Типоразмер муфты	Сечение жил, мм^2, кабеля на напряжение, кВ			Основные размеры, мм	
	1	6	10	L	D
СЭс-1	10÷35	—	—	400	50
СЭс-2	50÷120	—	—	470	75
СЭс-3	150	—	—	560	80
СЭ-1	—	10÷70	16÷50	670	76
СЭ-2	—	95÷120	70÷90	720	86
СЭ-3	185	150÷185	120÷750	760	101
СЭ-4	240	240	185÷240	830	103
СЭв-1	До 120	10÷70	16÷50	570	85
СЭв-2	150	95÷120	70÷95	620	95
СЭв-3	185	150÷185	120÷150	660	110
СЭв-4	240	240	185÷240	730	120
СЭм-1	До 10	—	—	218	110
СЭм-2	16÷50	—	—	222	162
СЭм-3	70÷120	—	—	226	178
СЭм-4	150÷240	—	—	230	184

муфт ПСслт для кабелей на напряжение до 1 кВ допускается применение муфт, предназначенных для соединения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. Одножильные кабели на 10, 20 и 35 кВ соединяются с помощью одножильных муфт из самосклеивающихся лент типа ПСОслт (рис. 20.11, *б*).

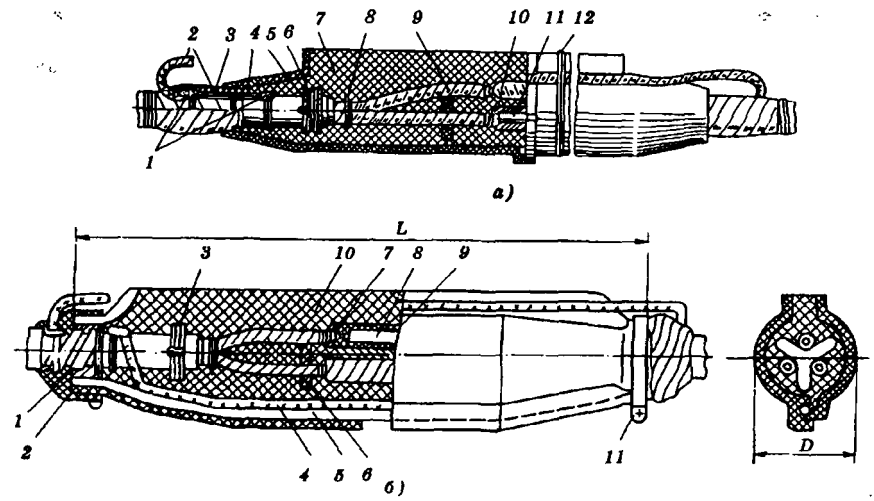


Рис. 20.9. Соединительная эпоксидная муфта на напряжение 6÷10 кВ (см. табл. 20.34)

а — с поперечным разъемом типа СЭ: *1* — пайка провода заземления к оболочке и броне; *2* — провод заземления; *3* — подмотка; *4* — корпус муфты; *5* — резиновое кольцо; *6* — металлический бандаж; *7* — заливаемый компаунд; *8* — бандаж по поясной изоляции; *9* — распорка; *10* — подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛППм; *11* — место соединения жил; *12* — бандаж из проволоки; *б* — с продольным разъемом типа СЭв: *1* — уплотняющая подмотка лентой ПВХ; *2* — кольцевая уплотняющая подмотка; *3* — резиновое кольцо; *4* — провод заземления; *5* — корпус муфты; *6* — распорка; *7* — бандаж из ниток; *8* — соединение жил; *9* — подмотка лентой ЛЭТСАР; *10* — компаунд; *11* — хомут

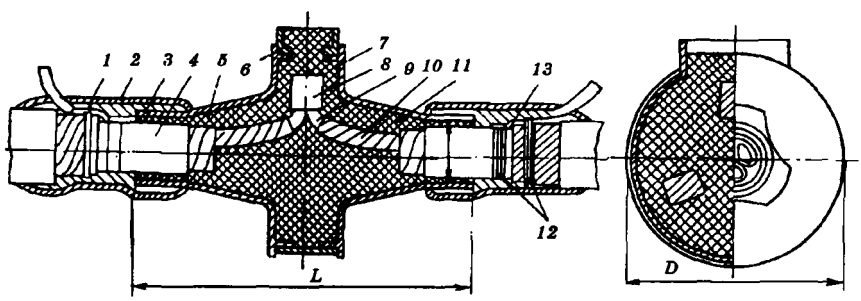


Рис. 20.10. Соединительная муфта типа СЭм на напряжение 1 кВ (см. табл. 20.34)

1 — подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛПм; *2* — то же ЛЭТСАР; *3*— уплотняющая подмотка (ЛЭТСАР ЛПм); *4* — оболочка кабеля; *5* — корпус муфты; *6* — цилиндрическое кольцо с литником; *7* — эпоксидный компаунд; *8* — место соединения жил; *9* — жила; *10* — изоляция жилы; *11* — заливаемый компаунд; *12* — проволочный бандаж; *13* — провод заземления

Для изолирования места соединения жил в этих муфтах используются самосклеивающиеся ленты на основе полиолефинов и кремнийорганических каучуков. Герметизация муфт достигается применением термоусаживаемых трубок. Для механической защиты муфты при прокладке в земле применяются защитные кожухи из стеклопластика.

Длины муфт для кабелей на 6÷10 кВ сечением жил 95÷240 мм^2 находятся в пределах 540÷840 мм, для кабелей на 35 кВ — 720 мм. Диаметр муфт по термоусаживаемой трубке может быть принят соответственно 30 и 40 мм.

Соединительная муфта для кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 110 кВ (МСАВв) имеет полиэтиленовую изоляцию, корпус муфты образуется термоусаживаемой трубкой. Длина дополнительной усиливающей изоляции составляет 360, общая длина муфты — 1430 мм. Максимальный диаметр муфты равен 78 мм.

Конструкции соединительных муфт маслонаполненных кабелей приведены на рис. 20.12 и 20.13. Усиливающая подмотка этих муфт выполняется из рулонов предварительно пропитанной кабельной бумаги. Основным отличием соединительной муфты для кабеля в стальной трубе от муфты для маслонаполненного кабеля низкого давления является размещение трех фаз муфт кабеля высокого давления в общем стальном корпусе.

Для предотвращения стекания пропиточного состава по кабелям с вязкой пропиткой на 1÷35 кВ при их прокладке по наклонным трассам необходимо секционирование линий. Длина секции выбирается так, чтобы давление от вертикального столба пропиточной массы не нарушало герметичности муфт кабеля. На кабельных линиях 1÷10 кВ для разделения линии на секции применяются обычные эпоксидные соединительные муфты.

Для кабелей на 20÷35 кВ используются стопорные муфты. По конструкции эти муфты анало-

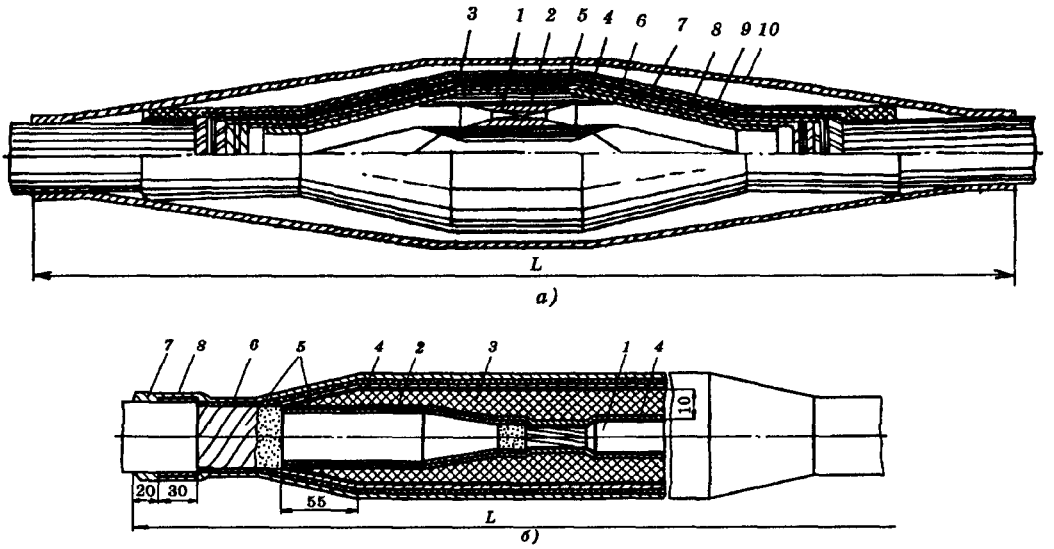


Рис. 20.11. Соединительные муфты из самосклеивающихся лент на напряжение 10 кВ

а — муфта типа ПСсл: *1* — гильза соединительная; *2* — адгезионные прослойки; *3* — восстановленная изоляция жил из ленты ЛЭТСАР; *4* — общая подмотка лентой ЛЭТСАР — поясная изоляция; *5* — полупроводящий экран из ленты ЛЭТСАР ЛПП; *6* — восстановленный металлический экран; *7* — провод заземления; *8* — бандаж; *9* — восстановленный наружный покров — трубка термоусаживаемая или лента ЛЭТСАР; *10* — кожух; *б* — муфта типа ПСОсл: *1* — гильза соединительная; *2* — адгезионные прослойки; *3* — восстановленная изоляция жил из ленты ЛЭТСАР; *4* — полупроводящий экран; *5* — восстановленный металлический экран; *6* — подмотка лентой из ПВХ пластиката; *7* — восстановленный наружный покров — трубка термоусаживаемая или лента ЛЭТСАР; *8* — адгезионная прослойка из ленты А для герметизации термоусаживаемой трубки

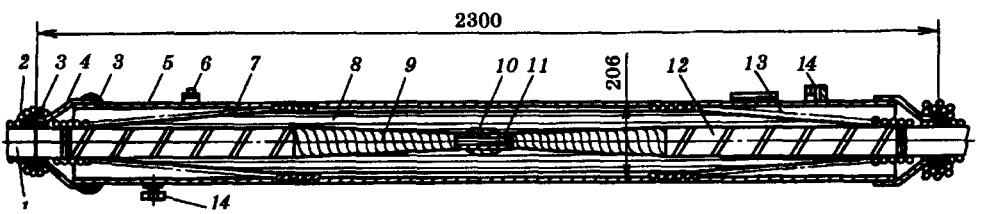


Рис. 20.12. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ

1 — оболочка кабеля; *2* — усиливающий проволочный бандаж; *3* — пайка; *4* — раструб; *5* — корпус муфты; *6* — болт заземления; *7* — выравнивающий конус; *8* — изоляция кабеля; *9* — разделка кабеля; *10* — соединительная гильза; *11* — жила кабеля; *12* — изоляция кабеля; *13* — изоляционное масло МН-4; *14* — заглушка

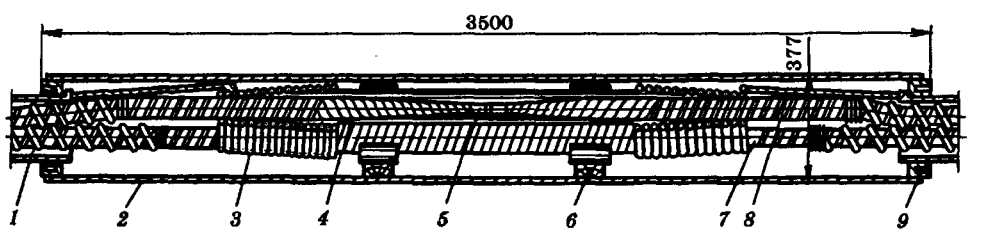


Рис. 20.13. Соединительная муфта маслонаполненного кабеля высокого давления в стальной трубе на напряжение 220 кВ

1 — жила кабеля; *2* — корпус муфты; *3* — проволочный экран; *4* — рулонная подмотка; *5* — соединительная гильза; *6* — подставка; *7* — медная перфорированная лента; *8* — провод заземления; *9* — переходное кольцо

гичны муфтам типа СЛО и отличаются от них наличием эпоксидного барьера.

Стопорные муфты маслонаполненного кабеля предназначены для ограничения гидростатического и гидродинамического давления масла в линии. В стопорной муфте производится соединение двух строительных длин кабеля, а также разделение изолирующего масла в двух смежных секциях кабельной линии. Конструкция стопорной муфты маслонаполненного кабеля представлена на рис. 20.14. Роль стопора по маслу здесь выполняет эпоксидный стопорный изолятор.

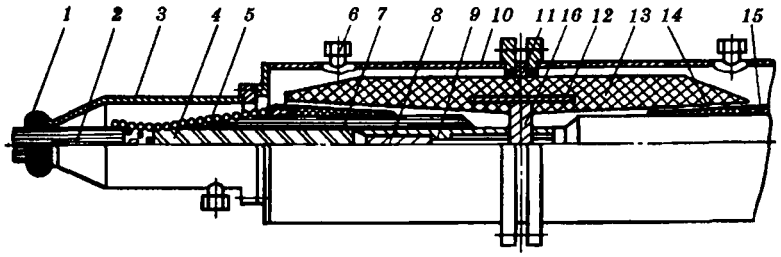


Рис. 20.14. Стопорная муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 110 кВ

1 — пайка; *2* — свинцовая оболочка; *3* — элемент корпуса; *4* — изоляция кабеля; *5* — проволочный экран; *6* — заглушка; *7* — усиливающая изоляция; *8* — жила кабеля; *9* — гильза; *10* — корпус муфты; *11* — стопорный элемент; *12* — электрод; *13* — изолятор; *14* — конусообразная насадка; *15* — заземленный электрод; *16* — стопорная перегородка

Для оконцевания кабелей на напряжения 1, 6 и 10 кВ с бумажной пропитанной изоляцией внутри помещения применяются концевые заделки типа КВЭ.

Конструкция заделок типа КВЭ представлена на рис. 20.15, основные геометрические размеры — в табл. 20.35. В заделках типа КВЭ герметизация жил разделанного кабеля может осуществляться с помощью трехслойных трубок из полиэтилена и поливинилхлорида (тип КВЭт) или термоусаживаемыми трубками (КВЭтт), надеваемыми на изолированные жилы. Основания таких заделок для улучшения герметизацни и увеличения механической прочности заливаются эпоксидным компаундом.

Для оконцевания кабелей с пластмассовой изоляцией 1÷10 кВ в помещениях должны использоваться муфты типа ПКВ, в которых в качестве изоляции используется липкая поливинилхлоридная лента. При установке в сырых помещениях вместо ПКВ следует использовать муфты типа ПКВЭ, где в месте разводки жил размещается корпус из эпоксидного компаунда подобно концевой заделке типа КВЭ.

Наиболее перспективным для указанных выше кабелей вместо подмотки поливинилхлоридными лентами является использование термоусаживаемых трубок или "перчаток" (муфты типа ПКВтт или ПКВтп).

Специальные муфты разработаны для оконцевания кабелей 1÷6 кВ не распространяющих горение, эксплуатнруемых в герметичных зонах АЭС (ПвКВОс). Буква "с" в маркировке указывает на их свойство не распространять горение ("самозатухающая").

В сырых помещениях вместо концевых заделок должны применяться концевые муфты внутренней установкн типа КВЭп, эти муфты имеют эпоксидные корпуса. Из корпуса муфты выводятся провода в пластмассовом шланге, жилы которых соединяются с жилами кабеля внутрн муфты (рнс. 20.16). Размер $H \approx 350 \div 390$ мм, $B \approx 230 \div 260$ мм.

Для оконцевания кабелей на напряжение 20÷35 кВ внутри помещений наиболее перспективными являются эпоксидные муфты типа КВЭО (рис. 20.17) для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией и муфты типа ПКВО для кабелей с пластмассовой изоляцией, изолятор которых выполнен из эластомера на основе кремнийорганнческой резины.

Для оконцевания кабелей с бумажной изоляцией 6 и 10 кВ в наружных установках используются металлические муфты типа КНЧ, КНА и т.д. с вертикально расположенными изоляторами (при соединении кабелей с трансформаторами и распределительными устройствами; рис. 20.18) и муфты типа КМЧ, КМА с изоляторами, расположенными на-

Таблица 20.35. Геометрические размеры заделок типа КВЭ
(см. рис. 20.15)

Типоразмер заделки	Сечение жил трехжильного кабеля, мм^2, при напряжении, кВ			Основные размеры, мм	
	1	6	10	*H*	*D*
КВЭ-1	До 50	До 25	—	160	80
КВЭ-2	70, 95	50	До 35	185	90
КВЭ-3	120, 150	70, 95	50, 70	190	100
КВЭ-4	185	120, 150	95, 120	195	110
КВЭ-5	240	185	150	205	120
КВЭ-6	—	240	185, 240	225	135

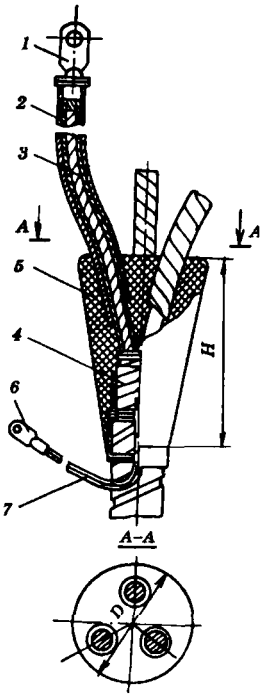


Рис. 20.15. Концевые заделки типа КВЭ (см. табл. 20.35)

1 — наконечник; *2* — трехслойная пластмассовая трубка; *3* — изолированная жила; *4* — металлическая оболочка кабеля; *5* — корпус *из эпоксидного компа*унда; *6* — наконечник провода заземления; *7* — провод заземления

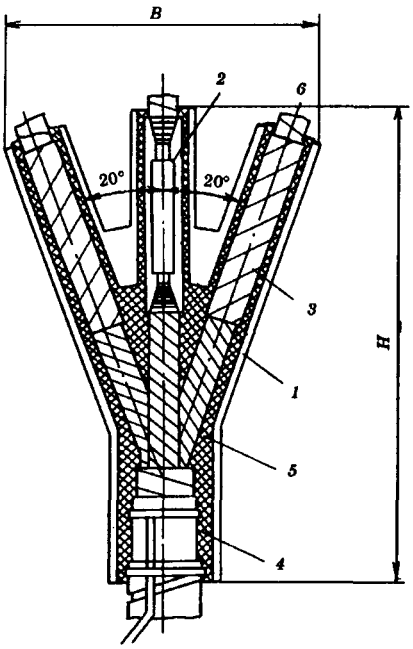


Рис. 20.16. Эпоксидная муфта типа КВЭп для оконцевания кабелей на напряжение 6 и 10 кВ в сырых помещениях

1 — эпоксидный корпус; *2* — медная гильза; *3* — изолирующая подмотка; *4* — герметизирующая подмотка; *5* — эпоксидный компаунд; *6* — выводные концы (кабель марки ВВ)

клонно, — мачтовые муфты (для соединения кабелей с воздушными линиями электропередачи; рис. 20.19). Эти муфты имеют чугунный — Ч или алюминиевый — А корпус и фарфоровые изоляторы. Оконцевание кабелей 1, 6 и 10 кВ может также выполняться эпоксидными муфтами типа КНЭ, у

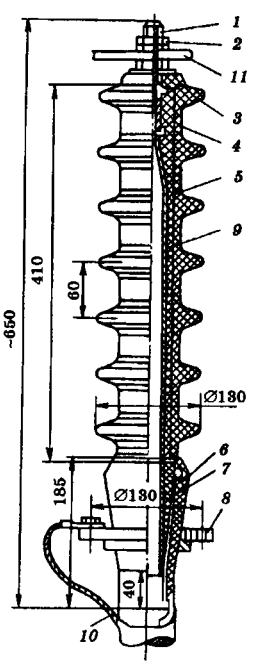


Рис. 20.17. Концевая муфта внутренней установки КВЭО-35

1 — наконечник; *2* — гайка; *3* — крышка; *4* — изолятор; *5* — заливка эпоксидным компаундом; *6* — конус; *7* — экран конуса; *8* — фланец; *9* — подмотка; *10* — провод заземления; *11* — шина

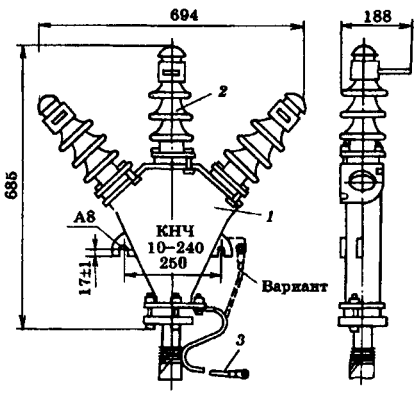


Рис. 20.18. Трехфазная концевая муфта наружной установки типа КНЧ для кабелей на напряжения 6 и 10 кВ

1 — металлический корпус; *2* — фарфоровый изолятор; *3* — заземляющий провод

которых корпус и изоляторы отливаются из эпоксидного компаунда. Эпоксидные муфты легче металлических, и монтаж их значительно проще.

Для оконцевания кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 1÷6 кВ при наружной установке применяются концевые эластомерные муфты ПКНР (рис. 20.20).

Для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение 20 и 35 кВ разработаны однофазные концевые муфты наружной установки с фарфоровым (КНО) или эпоксидным (КНЭО) изолятором. Последние более легкие и простые в монтаже.

Оконцевание кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 20 и 35 кВ производится однофазными муфтами с эпоксидным изолятором, отлитым из циклоалифатического компаунда (КНОЭц).

Наиболее перспективными являются муфты ПКНРО-10 и ПКНРО-35 с изоляцией из эластомеров (рис. 20.21).

Концевая муфта для кабеля с пластмассовой изоляцией на напряжение 110 кВ марки МКАПв состоит из фарфорового изолятора, усиливающей изоляции, напрессованной на изоляцию кабеля, токоведущего устройства и герметизирующих фланцев и втулок. Корпус муфты заполняется изолирующей жидкостью ПМС. Высота муфты примерно 2300, диаметр по фарфоровому изолятору 340 мм.

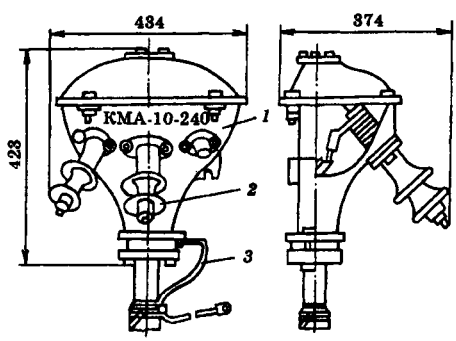


Рис. 20.19. Трехфазная мачтовая муфта типа КМА для трехжильных кабелей на напряжения 6 и 10 кВ

1 — металлический корпус; *2* — фарфоровый изолятор; *3* — заземляющий провод

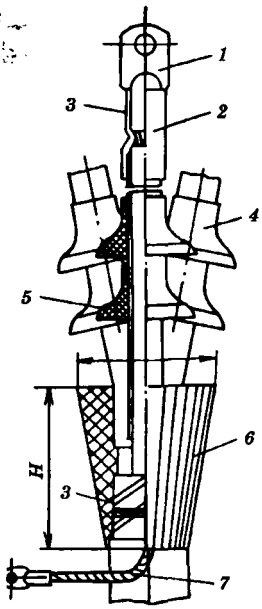


Рис. 20.20. Концевая эластомерная муфта наружной установки на напряжение 6 кВ

1 — наконечник; *2, 5* — термоусаживаемая трубка; *3* — подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛП; *4* — изолятор эластомерный; *6* — эпоксидный корпус; *7* — провод заземления

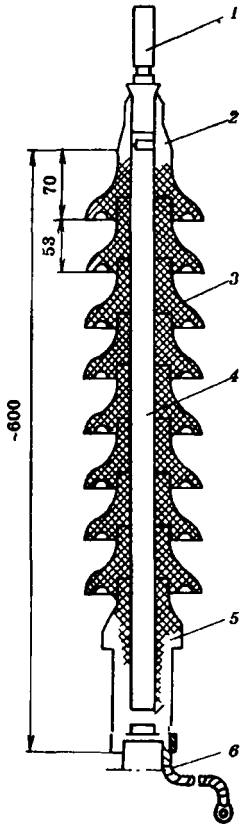


Рис. 20.21. Концевая эластомерная муфта наружной установки типа ПКНРО для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряженне 35 кВ

1 — наконечник; *2* — подмотка из самосклеивающейся ленты; *3* — юбка; *4* — кабель; *5* — выравнивающий конус; *6* — провод заземления

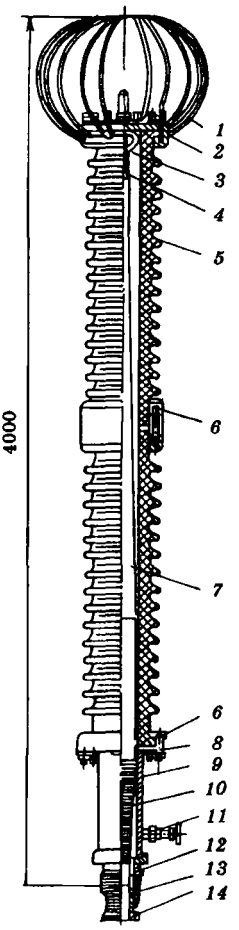


Рис. 20.22. Концевая муфта маслонаполненного кабеля низкого давления на напряжение 220 кВ

1 — верхний экран; *2* — токовыводное устройство; *3* — крышка муфты; *4* — жила кабеля; *5* — изолятор; *6* — съемное соединение; *7* — концевая кабельная заделка (конденсаторная подмотка); *8* — опорная плита; *9* — металлическая труба хвостовика; *10* — выравнивающий конус; *11* — сильфонный вентиль; *12* — переходный патрубок; *13* — пайка; *14* — изоляция кабеля

Для оконцевания маслонаполненных кабелей применяются концевые муфты открытого типа для работы внутри помещения или в наружных установках и концевые муфты закрытого типа для ввода в аппараты высокого напряжения — трансформаторы, реакторы, распределительные устройства и т.п.

Конструкция муфты открытого типа показана на рис. 20.22.

Внутренняя изоляция концевых муфт кабелей на 110 кВ и выше содержит экраны, позволяющне регулировать напряженность электрического поля внутри муфты. Кроме того, регулирование поля в муфтах на напряжение 110 кВ и выше обычно осуществляется с помощью конденсаторной подмотки или конденсаторных элементов.

Наиболее распространенными муфтами закрытого типа являются кабельные вводы в трансформатор или элегазовые распределительные устройства (рис. 20.23). Их конструкция существенно отличается от конструкции концевых муфт открытого типа, так как размещение кабельной муфты в среде масла или высокопрочного газа позволяет существенно уменьшить ее размеры.

Для поддержания определенного давления в кабельных линиях низкого давления применяются баки давления (рис. 20.24) марок БД-6-0,25 и БД-7-0,25. Эти же баки используются для поддержания избыточного давления в кабелях и стопорных муфтах во время их изготовления, транспортировки, хранения и монтажа. Давление масла в кабелях при подключении к линии баков поддерживается в определенных пределах за счет батареи сильфонных элементов с избыточным давлением азота в них $2{,}45 \cdot 10^4$ Па (0,25 кгс/см^2), расположенных внутри кожуха бака. Избыточное давление масла в баках, готовых к использованию, составляет $19{,}6 \cdot 10^4 \div 29{,}4 \cdot 10^4$ Па (2,0÷3,0 кгс/см^2). Отдача масла баками при изменении избыточного давления от $29{,}4 \cdot 10^4$ до $2{,}45 \cdot 10^4$ Па (3,0÷0,25 кгс/см^2) при температуре 20 °С составляет 50 л для бака марки БД-6-0,25 и 30 л для бака марки БД-7-0,25. Количество баков, необходимое для подпитки кабельной линии, а также места размещения пунктов подпитки определяются из расчета, учитывающего режимы работы кабельных линий, условия прокладки и профиль трассы.

Расстояние между подпитывающими пунктами для маслонаполненных кабелей низкого давления

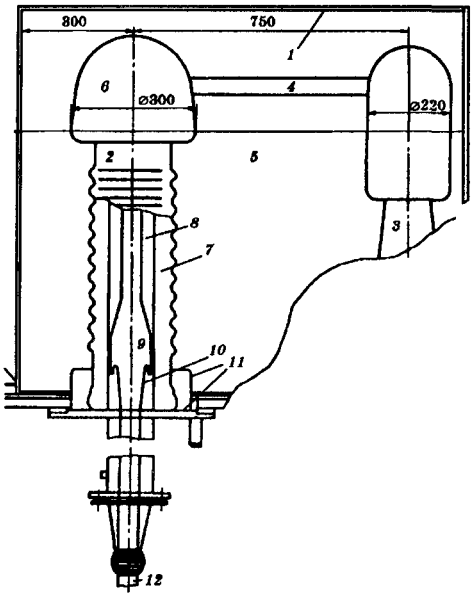


Рис. 20.23. Ввод кабеля с пластмассовой изоляцией 110 кВ в трансформатор

1 — промежуточная камера трансформатора; *2* — кабельный ввод в трансформатор; *3* — трансформаторный вывод; *4* — изолированная токовая перемычка; *5* — изоляционное (трансформаторное) масло; *6* — верхний экран кабельного ввода; *7* — фарфоровый изолятор; *8* — полиметилсилоксановая жидкость; *9* — напрессованная усиленная кабельная разделка; *10* — экранированный выравнивающий конус; *11* — экран и металлические детали с потенциалом земли; *12* — кабель с пластмассовой изоляцией

обычно лежит в пределах от 1 до 2 км. Для поддержания давления в маслонаполненных кабелях высокого давления применяется автоматическая подпитывающая насосная установка (рис. 20.25). Основными частями установки являются: бак для хранения масла под вакуумом, масляный насос, подающий масло из бака в линию, если давление падает ниже 1,4 МПа, перепускного вентиля, автоматически пропускающего масло из линии в бак при повышении давления свыше 1,6 МПа. Основные узлы в установке дублированы для обеспечения ее надежной работы.

Для обеспечения работы линии длиной 3 км достаточно установки с баком вместимостью около 4000 л.

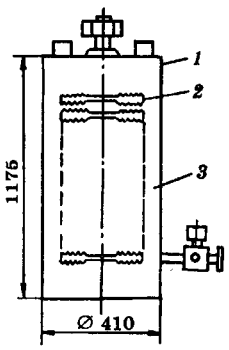


Рис. 20.24. Схема устройства бака БД-6-0,25

1 — конус; *2* — батарея сильфонных элементов; *3* — масло

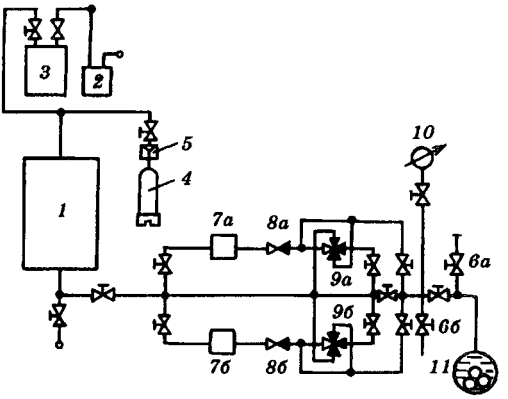


Рис. 20.25. Принципиальная схема подпитывающей установки

1 — бак для хранения масла под вакуумом; *2* — вакуумный насос; *3* — маслоотделительный бачок; *4* — баллон с азотом; *5* — редуктор; *6а* — вентиль для взятия пробы масла из линии; *6б* — вентиль для взятия пробы масла из подпитывающей установки; *7а* и *7б* — масляные насосы высокого давления; *8а* и *8б* — обратные клапаны; *9а* и *9б* — перепускные клапаны; *10* — манометр, контролирующий давленне масла в линии; *11* — трубопровод кабельной линии

20.13. КОНТРОЛЬНЫЕ КАБЕЛИ И КАБЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

Контрольные кабели применяются для подведения маломощных низковольтных управляющих сигналов к разнообразным техническим устройствам и съема информации о характере протекающих в них процессов. В настоящее время контрольные кабели выпускаются преимущественно с резиновой и пластмассовой изоляцией. В соответствии с ГОСТ 1508-71 они предназначены для неподвижного присоединения к электрическим приборам, аппаратам, сборкам зажимов электрических распределительных устройств номинальным переменным напряжением до 660 В частотой до 100 Гц или постоянным до 1000 В.

Токопроводящие жилы контрольных кабелей изготовляются из медной (М) или алюминиевой (А) проволоки. Установлены следующие размерные ряды для сечений токопроводящих жил, мм^2: медных — 0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4; 6; алюминиевых — 2,5; 4; 6; 10.

Изоляция изготовляется из кабельной пропитанной бумаги (в ограниченном масштабе), резины (Р), поливинилхлоридного пластиката (В), полиэтилена низкой плотности (П), самозатухающего полиэтилена (Пс), вулканизованного полиэтилена, фторопласта.

Изолированные жилы скручиваются в сердечник, который может состоять из следующего числа изолированных жил: 4, 5, 7, 10, 14, 19, 37, 52, 61. Поверх сердечника накладывается обмотка лентами из бумаги или синтетических пленок для обеспечения механической устойчивости и облегчения наложения оболочки из пластмасс или резины. Для оболочки используются следующие материалы: свинец (С), негорючая резина (Н), поливинилхлоридный

пластикат (В). В зависимости от условий прокладки и эксплуатации примеияются следующие виды броневых и защитных покровов: а) броня из двух стальных лент с противокоррозионным покрытием (БГ) или из одной профилированной (ББГ) — при прокладке внутри помещений, в каналах, туннелях, если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; б) броня из двух стальных лент с наружным защитным покровом (Б) или в шланге из поливинилхлоридного пластиката (ББШв) — при прокладке в земле (траншеях), если кабель не подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; в) броня из оцинкованных проволок с наружным защитным покровом или в шланге из поливинилхлоридного пластиката (ПБШв) — при прокладке в каналах, туннелях, земле (траншеях), если кабель подвергается воздействию значительных растягивающих усилий; г) броня из круглых стальных оцинкованных проволок с наружным защитным покровом (К) или в шланге из поливинилхлоридного пластиката — при прокладке под водой и в местах, где кабель подвергается значительным растягивающим усилиям. При прокладке в помещеннях, каналах, туннелях и отсутствии механических воздействий на кабель броневой покров отсутствует (Г).

По степени защищенности от внешних помех контрольные кабели изготовляются неэкранированными и экранированными (в общем экране) (Э).

В условиом обозначении (марке) кабеля содержится информация о назначении кабеля (К — контрольный), материалах жилы, изоляцин, оболочке, виде и конструкции брони и защитного покрова, при этом пользуются для обозначения буквами, приведенными выше в скобках.

В контрольных кабелях общего применения, эксплуатируемых в естественных условиях и не имеющих ограничения по габаритам и массе, применяется резиновая изоляция, а также в кабелях, применяемых в пожароопасных местах и в местах с повышенной концентрацией химически агрессивных веществ, используется изоляция из поливинилхлоридного пластиката. Для кабелей, габариты и масса которых ограничены, эксплуатирующихся в естественных условиях, применяется изоляция из полиэтилена низкой плотности. В кабелях, эксплуатируемых в пожароопасных помещениях, используется изоляция из самозатухающего полиэтилена. Для кабелей повышенной надежности, для кабелей с жесткими ограничениями по габаритам и массе при повышениых плотностях тока, для кабелей, эксплуатируемых в пожароопасных помещениях и в среде с повышенной химической активностью применяется изоляция из сополимеров тетрафторэтилена (фторопласт-40Ш).

Технические данные и число жил контрольных кабелей приведены в табл. 20.36.

Кабели управления, как и контрольные кабели, используются для передачи маломощных низковольтиых сигналов. Однако в отличие от последних они используются при существенно отлнчающихся условиях эксплуатации (подвижная эксплуатация, необходимость обеспечения защиты от взаимных и внешних помех, увеличенное число электрических цепей в кабеле, стойкость к действию различных механических, климатических воздействий и др.), которые определяют специфику конструкций этой группы кабелей.

В соответствии с ГОСТ 18404.0-78 "Кабели управления. Общие технические условия" кабели управления предназначены для передачи сигналов малой мощности переменным или импульсным напряжением до 1000 В частотой до 5000 Гц или постоянным до 1400 В от датчика к аппаратуре контроля и используются для дистанционного управления исполнительными механизмами при подвижном присоединении.

При отсутствии требований по помехозащищенности кабели управления выполняются неэкранированными. Если требуется защита цепей от взаимных помех, то кабели изготовляют со всеми экранированными изолированными жилами или с частью таких жил.

Если требуется защита от внешних помех, кабели изготовляются в общем (одинарном или двойном) экране. По составу и строению сердечника кабели управления могут быть однородными (сердечник состоит из экранированных или неэкранированных жил одного сечения), неоднородными (жилы разного сечения) или комбинированными (сердечник состоит из различных по назначению цепей — контроля и управления, силовых, высокочастотных и др.).

В соответствии с ГОСТ 18404.0-78 для кабелей управления установлены следующие ряды:

ряд сечений токопроводящих жил: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12;0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5 мм^2.

ряд чисел изолированных жил однородных кабелей управления: 3, 4, 7, 14, 19, 27, 30, 37, 52, 61, 91, 108 мм^2.

Принципы маркообразования кабелей управления регламентированы ГОСТ 18404.0-78. Каждому кабелю присваивают марку, состоящую из буквенных обозначений, указывающих (последовательно): группу кабелей (КУ), материал изоляции, наличие общего экрана (одинарного Э, двойного ЭЭ), материал оболочки, наличие панцирной оплетки (П). Если изоляция жил и оболочки кабеля выполнена из однотипного материала, то в обозначение марки входит только одна буква, соответствующая данному материалу.

По нагревостойкости кабели управления делятся на две группы: кабели нормальной и повышенной нагревостойкости.

Из кабелей нормальной нагревостойкости (максимальная температура длительной эксплуатации не превышает 70 °С) кабели с резиновой изоляцией и оболочкой в основном применяются для подвижной эксплуатации, с полиэтиленовой изоляцией и с оболочкой из поливинилхлоридного пластиката для фиксированной прокладки, с оболочкой из резины — для подвижной эксплуатации, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных пластикатов в основном для неподвижной прокладки в пожароопасных помещениях при возможности контакта с техническими маслами, бензином и другими агрессивными средами. Наиболее надежной конструкцией кабелей управления нормальной нагревостойкости является конструкция с комбинированной

Таблица 20.36. Контрольные кабели

Марка	Материал жилы	Номинальное сечение жилы, мм²						
		0,75	1	1,5	2,5	4	6	10
		Число жил в кабеле						
КРВГ, КРВГЭ, КРВБ, КРНБ, КРВБТ, КРВБбГ, КРНГ, КРНБГ, КРНБбГ, КРНБи, КВВБи, КПсВБи, КРВБи	М	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52			4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37	4, 7, 10		—
КВВГ, КВВГЭ, КВВБ, КВВБГ, КВВБбГ, КВБбШв, КПВГ, КПВБ, КПВВБГ, КПВБГ, КПБбШв, КПсВГ, КПсВГЭ, КПсВБ, КПсВБГ, КПсВБбГ, КПсБбШв	М	4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37, 52, 71						
КВВГ-П, КПсВГ-П, КПВГ-П	М	4						—
КППбШв, КВПбШв, КПсПбШв	М	10, 14, 19, 27, 37			7, 10, 14, 19, 27, 37	7,10		—
АКРКГ, АКРБГЭ, АКРВБ, АКРВБТ, АКРВБбГ, АКРНГ, АКРНБ, АКРНБТ, АКРНБбГ, АКВВГ, АКВВГЭ, АКВВБГ, АКВВБбГ, АКВБбШв, АКПВГ, АКПВВ, АКПБбШв, АКПсВГ, АКПсВГЭ, АКПсВБ, АКПсВВГ, АКПсВБбГ, АКПсБбШв, АКПВВбГ, АКВВБ	А	—			4, 5, 7, 10, 14, 19, 27, 37	4, 7, 10		
АКВВГ-П, АКПсВГ-П (плоские)	А	—				4		—
КФР (кабель с изоляцией из фторопласта-40Ш)	М	—	—	3, 5, 7, 12, 19	—	—		

Примечание. Пример расшифровки марок:

АКРВБбГ — кабель с алюминиевой жилой, изоляция из резины, оболочкой из ПВХ пластиката, броня из одной профилированной стальной ленты.

КПсВГЭ — кабель с медными жилами, изоляцией из самозатухающего полиэтилена, общий экран из алюминиевой или медной фольги, оболочка из ПВХ пластиката.

изоляцией из полиэтилена и капрона и резиновой оболочкой. Эти кабели могут применяться для подвижной эксплуатации в сложных атмосферных условиях.

К кабелям управления повышенной нагревостойкости относятся кабели с изоляцией из фторопласта 40Ш (180 °С), кремнийорганической резины (200 °С) и фторопласта-4 (250 °С). Они применяются для специальных целей и используются в тех случаях, когда температура окружающей среды находится в пределах 100+250 °С. Кабели с изоляцией из фторопласта-40Ш и фторопласта-4 с оболочками из кремнийорганической резины на основе фторкаучуков применяются для неподвижной прокладки.

Для подвижной эксплуатации используются кабели с изоляцией и оболочкой из кремнийорганической резины.

Сортамент и основные технические параметры кабелей управления приведены в табл. 20.37

20.14. СИЛОВЫЕ И УСТАНОВОЧНЫЕ ПРОВОДА И СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ШНУРЫ

Силовые и установочные провода с резиновой и пластмассовой изоляцией для электротехнических установок служат для распределения энергии силовых и осветительных установок при неподвижной прокладке на открытом воздухе и внутри помещений, а провода некоторых марок — при открытой прокладке в трубах или под штукатуркой, а также для питания электродвигателей и подключения промышленной и лабораторной переносной аппаратуры и приборов.

Провода изготовляются на напряжения 380, 660 и 3000 В переменного тока. Номенклатура проводов для электротехнических установок и преимущественные области применения приведены в табл. 20.38.

Провода с резиновой изоляцией допускают длительный нагрев жил до 65 °С, с теплостойкой резиной на основе бутилкаучука — до 85 °С, с кремнийорганической резиновой изоляцией — до 180 °С, с пластмассовой изоляцией — до 70 °С. Монтаж проводов допустим при температуре не ниже 15 °С.

Соединительные шнуры предназначены для присоединения различных бытовых электрических машин, приборов, радиоаппаратуры, телевизоров и других подвижных и неподвижных установок к электрическим сетям переменного напряжения до 660 В (табл. 20.39).

Длительно допустимая температура нагрева токопроводящих жил шнуров с резиновой изоляцией 65 °С, шнуров с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката 70 °С.

20.15. РАЗЛИЧНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА С ПЛАСТМАССОВОЙ И РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Номенклатура выпускаемых кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией очень широка, поэтому ниже приводятся сведения только о

Таблица 20.37. Сортамент и основные технические параметры кабелей управления

Марка кабеля	Сечение жилы, мм^2	Число жил (число экранированных жил)	Наружный диаметр кабеля, мм (наружный диаметр кабеля с экранированными жилами, мм)	Расчетная масса, кг/км (расчетная масса кабеля с экранированными жилами, кг/км)	Примечания
КУПВ	0,35	7÷108	7,5÷22,6	68÷684	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; оболочка — поливинилхлоридный пластикат; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; панцирная оплетка: стальная оцинкованная проволока, стальная нержавеющая проволока, медная луженая проволока
		(7÷52)	(10,1÷24,7)	(129÷791)	
	0,50	7÷108	7,8÷23,8	79÷829	
		(7÷52)	(10,4÷25,6)	(140÷870)	
КУПВ-П, КУПВ-Пи	0,35	7÷108	8,7÷23,8	114÷802	
		(7÷52)	(11,3÷25,9)	(191÷910)	
	0,50	7÷108	9÷25	125÷956	
		(7÷52)	(11,6÷26,8)	(211÷997)	
КУПВ-Пм	0,35	7÷108	8,7÷23,8	122÷822	
		(7÷52)	(11,3÷25,9)	(202÷931)	
	0,50	7÷108	9÷25	133÷977	
		(7÷52)	(11,6÷26,8)	(211÷1019)	
КУПР	0,35	4÷108	7,3÷23,8	58÷747	Изоляция — полиэтилен; экран — медная луженая проволока; оболочка — резина; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; обмотка — прорезиненная ткань; панцирная оплетка: стальная оцинкованная проволока, стальная нержавеющая проволока, медная луженая проволока
		(4÷52)	(9,3÷25)	(106÷856)	
	0,50	4÷108	7,5÷25	65÷896	
		(4÷52)	(9,8÷27)	(113÷937)	
	0,75	4÷37	8,6÷20,2	92÷515	
		(4÷19)	(10,3÷18,3)	(130÷450)	
	1,0	4÷37	9÷21,8	103÷687	
		(4÷19)	(11,4÷20,3)	(154÷568)	
	1,50	4÷37	10,3÷24,5	134÷667	
		(4÷19)	(12,9÷23)	(207÷824)	
КУПР-П, КУПР-Пн	0,35	4÷108	8,5÷25	103÷869	
		(4÷52)	(10,5÷27,2)	(168÷984)	
	0,50	4÷108	8,7÷25,2	110÷1021	
		(4÷52)	(14,0÷28,2)	(1751067)	
	0,75	4÷37	9,8÷21,4	141÷627	
		(4÷19)	(11,5÷19,5)	(194÷549)	
	1,0	4÷37	10,2÷23	157÷740	
		(4÷19)	(12,6÷21,5)	(222÷686)	
	1,5	4÷37	11,5÷25,7	190÷995	
		(4÷19)	(14,1÷24,2)	(275÷981)	
КУПР-Пм	0,35	4÷108	8,5÷25	111÷890	
		(4÷52)	(10,5÷27,2)	(178÷1006)	
	0,50	4÷108	8,7÷25,2	118÷1043	
		(4÷52)	(11,0÷28,2)	(186÷1090)	
	0,75	4÷37	9,8÷21,4	148÷645	
		(4÷19)	(11,5÷19,5)	(203÷565)	
	1,0	4÷37	10,2÷21,5	165÷760	
		(4÷19)	(12,6÷21,5)	(233÷706)	
	1,5	4÷37	11,5÷25,7	200÷1016	
		(4÷19)	(14,1÷24,2)	(286÷972)	
КУПКЭР	0,50	12	13,0	209	Изоляция — комбинированная из полиэтилена и капрона; экран — медная луженая проволока; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; оболочка — резина; панцирная оплетка — медная луженая проволока
	0,75	4	10,0	119	
		7	11,5	170	
КУПКЭР-П	0,50	12	14,2	295	
	0,75	4	11,2	185	
		7	12,7	244	
КУПКР-П	0,50	12	11,8	183	Изоляция — комбинированная из полиэтилена и капрона; обмотка — полиамидная или полиэтилентерефталатная пленка; оболочка — резина; панцирная оплетка — стальная нержавеющая проволока
		37	17,2	404	
	1,0	27	18,6	507	

Окончание табл. 20.37

Марка кабеля	Сечение жилы, мм^2	Число жил (число экранированных жил)	Наружный диаметр кабеля, мм (наружный диаметр кабеля с экранированными жилами, мм)	Расчетная масса, кг/км (расчетная масса кабеля с экранированными жилами, кг/км)	Примечания
КФШР	0,20	24 (7)	12,6	233	Изоляция — фторопласт-40Ш; экран — медная луженая проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — резина
	0,35	45 (7)	18,3	511	
	0,50	10÷48	10,6÷18,0	155÷529	
КФШЭР	0,20	10	10,9	170	
	0,35	19	13,2	282	
КБФРТ	0,50	12	12,3	232	Изоляция — фторопласт-40Ш; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — медная луженая проволока; оболочка — резина ШНН-45ЛТ
		24	15,2	434	
	0,75	4	8,8	147	
		7	9,8	192	
КУДФРУ	0,20	3÷52	8,5÷17,1	82÷399	Изоляция — фторопласт-40Ш; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — из медных луженых проволок; внутренняя оболочка — резина; оплетка — лавсановый шелк; наружная оболочка — резина
	0,35	3÷52	9,0÷19,2	94÷540	
	1,0	61	27,5	1268	
	1,50	3÷52	11,3÷28,8	167÷1467	
КУДФЭРУ	0,20	3÷52	9,4÷18,9	107÷522	
	0,35	3÷52	9,8÷21,0	119÷679	
КУС	0,12	7	8,6	93,5	Изоляция — кремнийорганическая резина; экран — посеребренная проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — кремнийорганическая резина
	0,5	1	8,6	93,5	
КФРВ	0,50	19	12,3	204	Изоляция — фторопласт-40Ш; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — кремнийорганическая резина; оплетка — лавсановые нити
КУФЭРС	0,35	2÷12	5,5÷8,2	53,2÷132,2	Изоляция — фторопласт-40Ш; обмотка — пленка из фторопласта-4; экран — медная луженая проволока; обмотка — пленка из фторопласта-4; оболочка — фторкаучук
	0,50	4	7,0	93	
	0,75	2÷12	6,8÷8,6	82÷166	
КУФЭФ	—	—	4,3÷7,4	33,9÷116,7	То же, оболочка — фторопласт

Таблица 20.38. **Марки, элементы конструкции и области прнменения силовых и установочных проводов**

Обозначение марки	Наименование элементов проводов	Преимущественные области примеиения	ГОСТ или ТУ
	Провода силовые с резиновой изоляцией		
ПРТО	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом	Для прокладки в трубах	ТУ16-705.456-87
АПРТО	То же, с алюминиевой жилой	То же	То же
ПРН	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в негорючей резиновой оболочке	Для прокладки в сухих и сырых помещениях, в пустотных каналах несгораемых строительных конструкций, а также на открытом воздухе	" "
АПРН	То же, с алюминиевой оболочкой	То же	" "

Продолжение табл. 20.38

Обозначение марки	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
ПРГН	То же, с медной гибкой жилой	Для прокладки при повышенной гибкости при монтаже и для соединения подвижных частей электрических машин в сухих помещениях, а также на открытом воздухе	ТУ 16-705.456-87
АППР	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, не распространяющей горение, с разделительным основанием	Для прокладки по деревянным поверхностям и конструкциям жилых и производственных сельскохозяйственных помещений, включая животноводческие помещения	То же
ПРВД	Провод гибкий, с медной жилой, с резиновой изоляцией, двухжильный, скрученный, с поливинилхлоридной оболочкой	В осветительных сетях сырых и сухих помещений	ТУ16-505.904-76
	Провода силовые с резиновой изоляцией с резиновой или поливинилхлоридной оболочкой, экранированные		
ПРП	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из стальных оцинкованных проволок	В осветительных и силовых цепях, вторичных сетях стационарных установок и механизмов при наличии легких механических воздействий на провод и отсутствии воздействий масел и эмульсий	ТУ16.К19-01-87
ПРРП	То же в резиновой оболочке	В осветительных и силовых цепях, вторичных цепях, в экскаваторах, машинах и механизмах при наличии механических воздействий на провод, воздействии масел и эмульсий	То же
ПРПВ	Провод с медной токопроводящей жилой, с резиновой изоляцией, в обмотке из стальных оцинкованных проволок, в поливинилхлоридной оболочке	Для работы при напряжениях до 660 В переменного тока частотой 50 Гц	" "
	Провода с пластмассовой изоляцией		
ПВ1	Провод с медной жилой, с поливинилхлоридной изоляцией	Для прокладки в стальных трубах, пустотных каналах строительных конструкций, на досках и др., для монтажа электрических цепей	ГОСТ 6323-79
АПВ	Провод с алюминиевой или с алюминиевой плакированной медью жилой, с поливинилхлоридной изоляцией	То же	То же
ПВ2	Провод с медной жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, гибкий	Для монтажа участков электрических цепей, где возможны изгибы проводов	" "
ПВ3	То же, повышенной гибкости	То же	" "
ПВ4	То же, особо гибкий	То же, где возможны частые изгибы проводов	" "
ППВ	Провод с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией, плоский, с разделительным основанием	Для негибкого монтажа	" "
АВТ	Провод с алюминиевой жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, с несущим тросом	Прокладка наружная для ввода в жилые дома и хозяйственные постройки в I и II районах гололедности	ТУ16.К71-015-87
АВТУ	Провод с алюминиевой жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, с усиленным несущим тросом	Прокладка наружная для ввода в жилые дома и хозяйственные постройки в III и IV районах гололедности	То же
АВТВ	Провод с алюминиевой жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, с несущим тросом, облегченный	Прокладка внутри помещений (в том числе животноводческих)	" "
АВТВУ	То же, с усилением тросом	То же, где требуется повышенная механическая прочность	" "

Окончание табл. 20.38

Обозначение марки	Наименование элементов проводов	Преимущественные области применения	ГОСТ или ТУ
	Провода силовые гибкие (нагревостойкие)		
ПРКА	Провод термостойкий, с медной жилой, в изоляционно-защитной оболочке из кремнийорганической резины повышенной твердости, одножильный	При фиксированном монтаже внутри осветительной аппаратуры, электроплит, жаровых шкафов и других бытовых электронагревательных приборов	ТУ16.505.317-76
ПАЛ	Провод с медной жилой, с асбестовой изоляцией, лакированный	Для стационарной прокладки в электроустановках, в осветительных сетях, для монтажа электрооборудования, машин, механизмов, приборов на номинальное напряжение 660 В частотой 50 Гц, для работы при температуре от —50 до 200 °С	ТУ16-505.656-74
ПАЛО	То же, облегченный	То же	То же
	Провода силовые гибкие для выводных концов электрических машин и аппаратов		
ПВВТ	Провод выводной с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, теплостойкий	Для работы на номинальное переменное напряжение 380 В частотой до 400 Гц в условиях агрессивных сред и масла при температуре эксплуатации от —40 °С до 105 °С, класс нагревостойкости А	ТУ16.К80-09-90
ПВКФ	Провод выводной с двухслойной изоляцией из кремнийорганической и фторсилоксановой резины	То же, но на напряжение 380 и 660 В, при температуре эксплуатации от —60 до 180 °С	То же
ПВФС	Провод выводной с изоляцией из фторсилоксановой резины	Для работы на напряжение 600 В частотой до 400 Гц и 1140 В частотой 60 Гц в условиях агрессивных сред и масла при температуре эксплуатации от —60 до 180 °С, класс нагревостойкости Н	ТУ16.К80-09-90
ПВКВ	Провод выводной с двухслойной изоляцией из кремнийорганической резины	Для работы на номинальное переменное напряжение 380 и 660 В частотой до 400 Гц при отсутствии агрессивных сред и масел и температуре эксплуатации от —60 до 180 °С, класс нагревостойкости Н	То же
РКГН	Провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины, в оплетке из стекловолокна, пропитанной кремнийорганический эмалью или теплостойким лаком	Для работы на номинальное переменное напряжение 660 В частотой до 400 Гц при отсутствии агрессивных сред и масел, температуре эксплуатации от —60 до 180 °С, класс нагревостойкости Н	То же
РКГМПТ	Провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины повышенной теплостойкости, в оплетке из стекловолокна, пропитанной эмалью или теплостойким лаком	Для работы на номинальное переменное напряжение 660 В частотой до 400 Гц при отсутствии агрессивных сред и масел и температуре эксплуатации от —60 до 200 °С, класс нагревостойкости С	ТУ16.К80-09-90

некоторых важнейших типах кабельной продукции, используемой для передачи и распределения электроэнергии.

Наиболее широкую группу кабелей с резиновой изоляцией и в резиновой оболочке составляют *гибкие кабели общего применения с медными жилами*, предназначенные для присоединения передвижных механизмов к электрическим сетям на номинальное переменное напряжение 660 В частотой до 400 Гц или постоянное напряжение до 1000 В. В соответствии с ТУ 16.К73.05-88 выпускаются кабели восьми марок: КГ, КТГ, КГН, КПГ, КПГН, КПГС, КПГСН, КПГУ. Кабели выпускаются с числом основных жил от одной до трех, номинальное сечение которых может составлять от 0,75 до 150 мм^2. Некоторые кабели имеют заземляющую жилу и однудве вспомогательные жилы. Сечение заземляющих жил в зависимости от сечения основной жилы

Таблица 20.39. Типы, марки, наименования и области применения шнуров (ГОСТ 7399-80)

Марка	Число / номинальное сечение жил, мм²	Наименование	Преимущественная область применения
ШВП	2 / 0,5; 0,75	Шнур с поливинилхлоридной изоляцией, с параллельными жилами, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/380 В, повышенной гибкости	Для присоединения радиоэлектронной аппаратуры, бытовых осветительных приборов, электроприборов микроклимата, электромеханических бытовых приборов, электровентиляторов и других подобных приборов, если шнур часто подвергается легким механическим деформациям
ШВП-2	2 / 0,35; 0,75	Шнур с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/380 В	То же, если шнур редко подвергается легким деформациям, и для присоединения преобразователей параметров тока, электровулканизаторов, зарядных устройств, надплитных электрофильтров и других подобных приборов, а также бытовых холодильников
ШВВП	2; 3 / 0,5; 0,75	Шнур гибкий с параллельными жилами с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке на номинальное напряжение до 380 В для систем 380/380 В	Для присоединения приборов личной гигиены, микроклимата, электропаяльников, светильников, кухонных электромеханических приборов, радиоэлектронной аппаратуры, шнуров удлинительных, стиральных машин, холодильников и других подобных приборов, эксплуатируемых в жилых и административных помещениях
ШВХ	2; 3 / 0,5; 0,75	То же, со скрученными жилами	
ШРО	2; 3 / 0,5÷1,5	Шнур гибкий со скрученной жилой, с резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной швейной нитки, синтетической нити или из их комбинации, на переменное напряжение до 380 В	Для присоединения бытовых электроутюгов
ШПС	2; 3 / 0,5; 0,75	Шнур со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, подвесной, грузонесущий, на переменное напряжение до 220 В для систем 220/380 В	Для присоединения светильников, подвешиваемых на электрическом шнуре
ПВС	2; 3; 4; 5 / 0,75÷2,50	Провод гибкий со скрученными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/660 В	Для присоединения электроприборов и электроинструмента по уходу за жилищем и его ремонта, шнуров удлинительных и разветвленных, стиральных машин, холодильников, средств малой механизации для садоводства и огородничества и других подобных машин и приборов
ПВСП	2 / 0,75	Провод гибкий с параллельными жилами, с ПВХ изоляцией, в ПВХ оболочке, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/660 В	
ПРС	2; 3; 4; 5 / 0,75÷4,0	Провод гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в резиновой оболочке, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/660 В	То же и электронагревательных приборов
ШВД	1 / 0,5; 0,75	Шнур гибкий с ПВХ изоляцией, одножильный на переменное напряжение до 380 В для систем 380/380 В	Для осветительной арматуры и электрогирлянд, для неподвижного защищенного монтажа внутри приборов (установок)
ШОГ	Две жилы из мишуриых нитей	Шнур двухжильный, особогибкий, с ПВХ изоляцией, с параллельными жилами, на переменное напряжение до 300 В для систем 300/300 В	Для присоединения электробритв, массажных и других подобных приборов с номинальной токовой нагрузкой не более 0,2 А

Окончание табл. 20.39

Марка	Число / номинальное сечение жил, мм²	Наименование	Преимущественная область применения
ШР	2 / 0,5÷1,5	Шнур двухжильный, гибкий, с резиновой изоляцией, с параллельными жилами, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/380 В	Для присоединения бытовых нагревательных приборов
ПРМ	2; 3; 4; 5 / 0,75÷2,50	Провод гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, в оболочке из маслостойкой резины, на переменное напряжение до 380 В для систем 380/660 В	Для присоединения электроприборов и электроинструмента по уходу за жилищем и его ремонта, шнуров удлинительных и разветвлениых, средств малой механизации для садоводства и огородничества, электронагревательных приборов, контактируемых с маслами и смазками
ПСГ	1; 2; 3; 4; 5 / 1×(1,5÷400); 2×(1,0÷25); 3×(1,0÷95); 4×(1,0÷150); 5×(1,0÷25)	Провод гибкий со скрученными жилами, с резиновой изоляцией, с усиленной оболочкой из маслостойкой резины, на напряжение до 450 В для систем 450/750 В	Для передвижных токоприемников и механизмов

составляет 0,75÷50, сечение вспомогательных жил 1,5÷10 мм².

В соответствии с ТУ 16.К73.03-88 выпускаются *силовые гибкие кабели для дуговой сварки*. Кабели с медными жилами с резиновой изоляцией предназначены для соединения при дуговой сварке электрододержателей автоматических или полуавтоматических сварочных установок на номинальное напряжение 220 В переменного тока частотой 50 Гц или постоянного напряжения. Марки кабелей — КОГ1 и КОГ2.

Резиновая изоляция и оболочка продолжают сохранять свое доминирующее положение в целом ряде *кабелей специального назначения*, среди которых можно выделить следующие:

1. *Кабели и провода для горных разработок и землеройных работ*. Эти кабели предназначены для присоединения различных передвижных машин и механизмов, например экскаваторов, шахтных комбайнов, шахтного бурильного инструмента и т.д. к электрическим сетям. К числу таких кабелей относятся гибкие силовые экскаваторные кабели на напряжение 6 и 10 кВ, гибкие шахтные кабели, в том числе с экранированными жилами, гибкие экранированные шахтные кабели для бурильного иструмента.

2. *Высоковольтные рентгеновские кабели*. Эти кабели предназначены для подвода тока накала и высокого напряжения к однофокусным или двухфокусным рентгеновским трубкам. Кабели рассчитаны на выпрямленное пульсирующее напряжение до 150 кВ или переменное напряжение 55 кВ.

3. *Кабели для радиоустановок*. Такие кабели предназначены для монтажа радиоустановок на переменное напряжение 380, 660 и 3000 В частотой до 400 Гц или постоянное 700, 1000 и 6000 В. Если требуется защита от радиопомех, то кабели выполняются экранированными.

4. *Кабели аэродромные*. Рассчитаны на напряжение переменного тока 250, 660, 3000 и 6000 В. Низковольтные кабели на напряжение 250 В предназначены для подключения аэродромных огней или светосигнальных знаков ко вторичной обмотке трансформаторов, а также кабельных вводов трансформаторов. Низковольтные кабели на напряжение 660 В соединяют аэродромные огни, освещающие площадки посадки самолетов. Высоковольтные кабели на напряжение 3 и 6 кВ соединяют в общую цепь первичные обмотки трансформаторов, питающих аэродромные огни, и используются для присоединения к регуляторам яркости. Кроме того, кабели на напряжение 3 кВ соединяют высоковольтные обмотки трансформаторов для аэросветосигналов.

Большую группу кабельной продукции составляют *кабели и провода для подвижного состава*, которые выпускаются как с резиновой, так и с пластмассовой изоляцией. Эти кабели и провода предназначены для внутренних и наружных соединений электрооборудования всех видов подвижного состава рельсового транспорта и троллейбусов и выпускаются в соответствии с ТУ 16-505.657-74 и ТУ 16-705.465-87. Они рассчитаны для использования при переменном напряжении от 660 до 4000 В частотой до 400 Гц и постоянном напряжении от 1000 до 6000 В. Марки проводов и кабелей для подвижного состава: ППСВ, ППСРМО, ППСРМ, ППСРН, ППСРВМ, КПСРВМ, КПСРМ.

Для эксплуатации на лифтовых установках при номинальном постоянном или переменном напряжении до 380 В используются *лифтовые кабели (многожильные гибкие подвесные кабели со стальным грузонесущим тросом)*, с медными жилами, с полиэтиленовой изоляцией, в резиновой или поливинилхлоридной оболочке, выпускаемые по ГОСТ 16092-78.

Лифтовые кабели выпускаются экранированными и неэкранированными, с числом жил от 6 до 24. Марки лифтовых кабелей: КПВЛ, КПВЛЭ, КПВЛМ, КПВЛЭМ.

20.16. МОНТАЖНЫЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА

Кабели и провода предназначены для фиксированного монтажа приборов, аппаратов, электронной и электрической аппаратуры, монтажа АТС и коммутационных аппаратов. Номенклатура наиболее употребительных марок кабелей и проводов для внутриприборного и межприборного монтажа приведена в табл. 20.40. Более подробные сведения о сортаменте и характеристиках монтажных проводов приведены в [20.1].

Монтажные кабели МКШ и МКЭШ предназначены для работы при напряжении до 500 В частотой до 400 Гц или постоянном токе до 750 В при температуре от —40 до 60 °С и относительной влажности 98% при 20 °С.

Малогабаритные кабели с пластмассовой изоляцией и оболочкой КМПВ, КМПВЭ, КМПВЭВ, КМПЭВ, КМПЭВЭ предназначены для работы при напряжениях 500 и 1000 В частотой до 200 кГц или соответственно при постоянных напряжениях 750 и 1500 В при температуре от —50 до 65 °С и относительной влажности 98% при 35 °С.

Провода с ПВХ изоляцией МНВ сечением 0,03÷0,20 мм^2 предназначены для работы при напряжении до 150 В постоянного тока или 100 В переменного тока частотой до 5 кГц при температуре

Таблица 20.40. Номенклатура монтажных кабелей и проводов

Марка	Наименование	ГОСТ, ТУ	Число жил или пар	Сечение, мм^2
	Кабели многожильные с ПВХ изоляцией			
МКШ	С многопроволочной жилой в ПВХ оболочке	ГОСТ 10348-80	2÷14	0,35÷0,75
МКЭШ	То же экранированный	То же	2÷14	0,35÷0,75
КМПВ	Кабель с полиэтилеиовой изоляцией в ПВХ оболочке	ТУ 16-705.169-80	1÷52	0,35÷1,5
КМПВЭ	То же в общем экраие	То же	1÷37	2,5
КМПВЭВ	То же в защитиой ПВХ оболочке	" "	1÷37	2,5
КМПЭВ	Кабель с полиэтилеиовой изоляцией с экраиированиыми жилами в ПВХ оболочке	" "	2÷52	0,35÷1,5
КМПЭВЭ	То же в общем экраие	" "	2÷52	0,35÷1,5
ШЗВЭВ	В общем экране, ПВХ оболочке, для сигнальных цепей в бытовой аппаратуре	ТУ 16-505.677-74	1	0,8
	Провода с ПВХ изоляцией			
НВ (НВЭ)	С одно- или многопроволочной медной луженой жилой (экраиированиый)	ГОСТ 17515-72	1	0,08÷2,5
НВМ (НВМЭ)	То же, что НВ, с иелуженой проволокой (экраиированиый)	То же	1 (1, 2, 3)	0,08÷2,5
МНВ	Малогабаритный низковольтный с изоляцией из ПВХ	ТУ 16-505.928-76	1	0,03÷0,20
	Провода с ПЭ изоляцией			
МПМ	С жилой из медных луженых проволок с ПЭ изоляцией	ТУ 16-505.495-81	1	0,12÷1,5
МПМЭ	То же экранированный	То же	1	0,12÷1,5
МПМУ	С упрочеииой жилой из медиых и сталемедных луженых проволок с ПЭ изоляцией	" "	1	0,12÷0,35
МПМУЭ	То же экраиированный	" "	1, 2, 3	0,12÷0,35
МПКМ	С жилой из медных луженых проволочек с полиэтилеиовой изоляцией в капроновой оболочке	" "	1	0,12÷1,5
МПКМЭ	То же экранированный	" "	1	0,12÷1,5
МПКМУ	С упрочеииой жилой из медных и сталемедных луженых проволок с полиэтиленовой изоляцией в капроновой оболочке	" "	1	0,12÷0,35
МПКМУЭ	То же экранированиый	" "	1	0,12÷0,35
ПВМП-2 (-2,5;-4)	С многопроволочной жилой на напряжеиие 2 кВ (2,5 кВ; 4 кВ)	ТУ 16-505.253-79	1	0,12÷0,35
РМПВН	В ПВХ оболочке радиомонтажный	ТУ 16-505.473-78	1	0,75
	Кабели с ПЭ изоляцией			
КИПЭ	С многопроволочиыми медными жилами в ПЭ оболочке (экраиированный)	ТУ 16-505.340-77	20(16+4)	0,5; 1,5
КППЭ	Со сталемедными частично экранированными жилами в ПЭ оболочке	ТУ-16-505.294-77	12	1,0

Окончание табл. 20.40

Марка	Наименование	ГОСТ, ТУ	Число жил или пар	Сечение, мм^2
	Провода с изоляцией из облученного ПЭ			
МЛП (МПЛЭ)	С дополнительной полиэфирной изоляцией (экраиированный)	ТУ 16-505.871-76	1	0,20÷1,0
МЛПГ	То же с гибкой жилой	То же	1	0,20
МЛТП, МЛТПЭ, МЛТПГ	То же, изоляция термостабилизированная	" "	1	0,08÷6
МПО (МПОЭ)	С многопроволочиой жилой (экранированый)	ТУ 16-505.339-79	1	0,12÷6,0
МПОУ (МПОУЭ)	То же с усиленной биметаллической жилой (экраиированный)	То же	1	0,12; 0,20; 0,35
МСТП (МСТПЭ)	С дополнительной изоляцией из стекловолокна (экраиированный)	ТУ 16-505.554-81	1	0,12÷6,0
МСТПГ	То же гибкий	То же	1	0,20
МСТПЛ	То же, что МСТП, в оболочке полиэфириыми нитями	" "	1	0,12÷6,0
	Кабели и провода с фторопластовой (Ф-4) изоляцией			
КМТ	Кабель со стекловолокнистой и фторопластовой изоляцией	ТУ 16-505.621-79	8э+24	0,35
МПО 33-11 (МПОЭ 33-11)	Провод с гибкой медной жилой в оплетке полиэфирными нитями лакированный (экранированный)	ТУ 16-505.324-80	1	0,12÷1,5
МПО 33-12 (МПОЭ 33-12)	Провод с гибкой медиой жилой в оболочке в виде термообработанной обмотки ПЭТФ лентой (экранированный)	То же	1	0,12÷1,5
МС 26-12	С многопроволочиой жилой из посеребренных медных проволок с изоляцией Ф-40Ш на напряжеиие 250 В	ТУ 16-505.530-81	1	0,12÷2,5
МС 36-12	То же на напряжение 500 В	То же	1	0,12÷2,5
ПМОФ	Провод особогибкий в оплетке полиэфирными нитями	ТУ 16-505.162-79	1	0,3; 0,5
	Провода плоские (ленточные)			
КПВР (Э)	С круглыми лужеиыми жилами с ПВХ изоляцией распределительный (экранированный)	ТУ 16-505.511-79	4÷20	0,12÷0,50
КППР (М), (О), (Э), (ЭО)	То же с полиэтиленовой изоляцией, (увеличенный шаг укладки жил), (с изоляцией из облучеиного ПЭ), (экранированный)	То же	4÷22	0,12; 0,20
ЛЛПСА	С алюмиииевыми жилами с изоляцией из ПТФЭ плеики	ТУ 16-705.303-83	16	0,30
ЛЛПСВ-100, (-120), (-150)	С круглыми однопроволочными медными жилами с изоляцией из ПТЭФ-ПЭ с волиовым сопротивлением 100 Ом, (120 Ом), (150 Ом)	ТУ 16-705.137-80	10÷22	0,12÷0,26
ЛПВ	С гибкими медиыми жилами с ПВХ изоляцией и оболочкой из ПВХ	ТУ 16-705.210-81	4	0,08
ЛПП	С плоскими жилами с ПЭТФ и ПЭ изоляцией	ТУ 16-505.728-81	3, 6, 12	0,08; 0,12; 0,20
ЛППВ (Л)	То же с ПЭ изоляцией и ПВХ оболочкой (лужеиые жилы)	ТУ 16-705.210-81	4	0,08
ЛСВ-2	С гибкими жилами с ПВХ изоляцией	ТУ 16-705.403-85	16, 20, 24, 30	0,12; 0,20
ЛВС-4	То же с медными никелированиыми жилами	То же	16, 20, 24, 30	0,12; 0,20
ПВП	С однопроволочиыми медными жилами с ПЭ изоляцией	ТУ 16-505.558-79	24, 48, 60	0,20
ПВП-1	То же с кодовой дорожкой	То же	48, 60	0,18
ПВПмс	То же, что и ПВП, с посеребреиными жилами	" "	48,60	0,20
ПЛВВ	С ПВХ изоляцией и оболочкой, телевизионный	ТУ 16-505.180-80	8, 9	0,02
ЛВ	Состоящий из жил с ПВХ изоляцией	ТУ 16-505.956-76	2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 24, 30	0,12÷0,35
ЛВКЭВ	Состоящий из жил с ПВХ изоляцией в капроновой оболочке экранированный с наружной ПВХ оболочкой	То же	4, 10, 15, 20	0,12÷0,35

от —50 до 70 °С и относительной влажности 98% при 40 °С. Сопротивление изоляции проводов в нормальных условиях ие менее $2 \cdot 10^8$ Ом·м, а при эксплуатации и хранении — не менее $5 \cdot 10^7$ Ом·м.

Провода с ПВХ изоляцией группы НВ, НВМ предназначены для работы при напряжении 500 и 1000 В частотой 5 кГц или 700 и 1400 В постоянного тока при температуре от —50 до 70 °С.

Провода МПМ предназначены для работы при напряжении до 250 В переменного тока частотой 5 кГц и постоянном напряжении до 350 В при температуре от —50 до 85 °С.

Провода ПВМП-2; -2,5; -4 предназначены для работы при переменном токе 2; 2,5 и 4 кВ при температуре от —60 до 85 °С. Провода поставляют длинами не менее 10 м.

Провода КППЭ предназначены для работы при напряжении 250 В частотой до 0,4 кГц при температуре от —55 до 65 °С. Кабель КИПЭ — при переменном напряжении до 220 В и при температуре от —60 до 85 °С.

Провода с радиационно-модифицированной полиэтиленовой изоляцией марок МПО, МПОЭ, МПОУ и МПОУЭ предназиачены для работы при переменном напряжении до 380 В частотой до 10 кГц или до 160 В частотой до 4 МГц или 550 В постоянного тока при температуре от —60 до 100 °С.

Провода МЛП, МЛПГ и МЛПЭ предназначены для работы прн напряжении 380 В переменного тока частотой 1 кГц при температуре от —60 до 100 °С; провода МСТП, МСТПГ, МСТПЛ и МСТПЭ — при напряжении до 500 В, а сечением 0,12 мм^2 — до 250 В переменного тока частотой 1 кГц при температуре от —60 до 150 °С.

Кабель КМТ предназначен для работы при переменном напряжении до 380 В частотой 5 кГц или 600 В постоянного тока при температуре от —60 до 250 °С.

Провода МПО 33-11, МПО 33-12, МПОЭ 33-11, МПОЭ 33-12 предназначены для работы при переменном напряжении до 500 В частотой до 5 кГц или 700 В постоянного тока при температуре от —60 до 120 °С, а провода МС 26-12 — при переменном напряжении 250 В, (провода МС 36-12 — при 500 В) частотой до 5 кГц и при напряжении 350 В (700 В) постоянного тока при температуре от —60 до 200 °С.

Провода ЛПП и ЛППЛ предназначены для работы при напряжении промышленной частоты до 250 В, частотой 2 кГц —100 В и до 10 МГц —3 В или 400 В постоянного тока при температуре от —60 до 70 °С. Провода ПВП, ПВПмс и ПВП-1 предназначены для работы: ПВП — при напряжении до 100 В переменного тока частотой до 1 кГц, 10 В переменного тока частотой до 50 МГц; ПВПмс и ПВП-1 — при напряжении до 100 В переменного тока частотой до 1 кГц, до 10 В переменного тока частотой до 10 МГц, до 2 В переменного тока частотой 30 МГц или 150 В постоянного тока при температуре от —60 до 70 °С.

Провод ПЛВВ предназначен для работы при переменном напряжении 250 В частотой до 5,5 МГц или постоянном напряжении 380 В при температуре от —40 до 70 °С.

Кабели КППР предназначены для работы при напряжении 250 В частотой до 2 кГц или до 500 В постоянного тока при температуре от —60 до 70 °С (кабели КПВР — от —50 до 70 °С).

Провода ЛПВ и ЛППВ предназначены для работы в условиях подвижного монтажа при напряжении 100 В частотой до 20 кГц при температуре от —40 до 70 °С. Провода предназначены для работы при постоянном напряжении 500 В и переменном напряжении 250 В частотой 50 Гц н 115 В частотой 1 кГц при температуре от —40 до 60 °С.

Провода ЛВ, ЛВКЭВ предназначены для работы при напряжении до 250 В переменного тока частотой до 20 кГц или 380 В постоянного тока при температуре от —50 до 70 °С

Термопарные провода ПТВ, ПТВО, ПТВП предназначены для работы прн температуре от —40 до 70 °С, ПТВТ — от —40 до 105 °С, ПТП — от —60 до 120 °С, ПТФ — от —60 до 259 °С, ПТН — от —60 до 650 °С, ПТНО-900 — от —60 до 900 °С.

20.17. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА С ЭМАЛЕВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией, илн эмалированные провода, удобно классиицировать по температурному ннднексу (ТИ), т.е. по температуре, °С, при которой провода сохраняют определенные свойства в течение базового ресурса 20 000 ч.

Сведения о температурных индексах н конструктивных данных основных типов круглых медных эмалированных проводов приведены в табл. 20.41.

Эмалированные провода для обмоток электрнческих машин, аппаратов и приборов с ТИ 105 °С (класс нагревостойкости А) выпускаются как с изоляцией на основе масляных лаков — провод марки ПЭЛ, так и на основе синтетнческих лаков — провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2. Провода марки ПЭЛ имеют наименьшую толщину изоляции, обладают хорошими электроизоляционнымн характернстиками, однако механические свойства эмалевой изоляции и ее стойкость к растворителям невысокие. Поэтому эти провода применяются в основном для намотки катушек электрических аппаратов, рамок приборов и т.п. Для обмоток электрнческих машин эти провода могут применяться только при условин наложения на слой проводов обмотки из хлопчатобумажной, шелковой или синтетической пряжи.

Наиболее массовыми проводамн, прнменяемымн для электрических машин и аппаратов в снстемах изоляции класса нагревостойкости А, являются провода с изоляцией на основе поливинилацеталевых смол ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные поливнннлформальэтилалевым лаком "винифлекс". Высокая механическая прочность изоляции, ее высокне адгезионные свойства и стойкость этих проводов к действию ароматических растворителей позволяют использовать провода для обмоток электрических машин без наложения дополнительного слоя волокна.

Для эксплуатации в обмотках электродвигателей холодильных агрегатов используются эмалированные провода марки ПЭМФ, которые, имея при работе в воздушной среде ТИ 105 °С, успешно эксплуатируются в среде хладагента — хладона-12 при температуре 120 °С (класс нагревостойкости Е). В качестве электрической изоляции используется отечественный поливинилформалевый лак "метальвин" или его зарубежные аналоги.

При соответствии всех остальных параметров требованиям, предъявляемым к традиционным проводам с поливинилацеталевой изоляцией, провода

Таблица 20.41. Нагревостойкость и конструктивные данные основных типов круглых медных эмалированных проводов

Марка провода	Номинальный диаметр токопроводящей жилы, мм	Минимальная диаметральная толщина изоляции, мм	Температурный индекс, °С	Действующая техническая документация
ПЭЛ	0,02÷1,08	0,004÷0,050	105	ТУ 16-705.459-87
ПЭВ-1	0,02÷2,50	0,002÷0,055	105	ГОСТ 7262-78
ПЭВ-2	0,05÷2,50	0,009÷0,070	105	То же
ПЭМФ	0,05÷1,25	0,012÷0,050	105	ТУ 16.505.583-77
ПЭВЛ	0,05÷0,25	0,006÷0,013	120	ТУ 16-505.446-77
ПЭВТЛ-1	0,015÷1,60	0,002÷0,04	120	То же
ПЭВТЛ-2	0,02÷1,60	0,004÷0,06	120	" "
ПЭВТЛН-1	0,015÷1,60	0,002÷0,04	120	" "
ПЭВТЛН-2	0,02÷1,60	0,004÷0,06	120	" "
ПЭВТЛК	0,06÷0,355	0,015÷0,050	130	ТУ 16-505.480-73
ПЭТВ-2	0,06÷2,50	0,010÷0,07	130	ОСТ 16.0.505.001-80
ПЭТВ-2-ТС	0,06÷2,50	0,010÷0,07	130	То же
ПЭТВМ	0,25÷1,40	0,035÷0,065	130	ТУ 16.505.370-78
ПЭТВ-Р	0,02÷0,20	0,006÷0,015	130	ТУ 16.705.110-79
ПЭТКД	0,20÷0,45	0,03÷0,058	130	ТУ 16.705.354-84
ПЭТВ-БЖ	0,02÷0,20	0,004÷0,015	130	ТУ 16.505.718-75
ПЭТ-155	0,06÷2,50	0,010÷0,070	155	ГОСТ 21428-75
ПЭТМ-155	0,50÷2,80	0,007÷0,080	155	ТУ 16-705.173-80
ПЭФ-155	0,063÷1,80	0,008÷0,070	155	ТУ 16.505.673-77
ПЭТД-180	0,20÷2,00	0,03÷0,080	180	ТУ 16-705.264-82
ПЭТ-200	0,017÷2,50	0,001÷0,070	200	ТУ 16.505.937-76
ПНЭТ-имид	0,030÷2,50	0,003÷0,042	220	ТУ 16.505.489-78

марки ПЭМФ должны иметь высокую стойкость к действию холодильных агентов: доля экстрагированного вещества из изоляции провода в трихлорэтане не должна превышать 1%.

Для систем изоляции с ТИ 120 °С (класс нагревостойкости Е) выпускаются эмалированные провода с изоляцией на основе полиуретанового лака — провода марок ПЭВЛ, ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2, различающиеся толщиной изоляции. Особенностью этих проводов являются термопластичные свойства изоляционного слоя (температура размягчения 160 °С), что ограничивает область их применения. Провода марок ПЭВТЛ предназначены для применения в приборостроительной, электроаппаратной и радиотехнической промышленности; эти провода могут также использоваться для обмоток электродвигателей малой мощности. Основным преимуществом этих проводов является способность облуживаться без предварительной зачистки изоляции.

С полиуретановой изоляцией выпускаются также лудящиеся немагнитные провода марок ПЭВТЛН-1 и ПЭВТЛН-2, которые содержат минимальное количество магнитных включений. Такие провода применяются в подвижных рамках электроизмерительных приборов, где наличие магнитных включений создает дополнительный паразитный момент, нарушающий нормальную работу.

Все перечисленные провода с полиуретановой изоляцией должны облуживаться без предварительного удаления изоляции при температуре 375 °С за несколько секунд.

Провода с ТИ 130 °С (системы изоляции класса нагревостойкости В) имеют изоляцию на основе полиэфирных (полиэтилентерефталатных) лаков: марки проводов ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2. Как и для эмалированных проводов других марок, индекс 2 обозначает, что провод имеет изоляцию нормальной толщины, а индекс 1 — пониженной толщины. Для изоляции проводов могут использоваться как полиэфирные лаки, так и расплав полиэфирной смолы, используемый для эмалирования проволоки без применения растворителей.

Провода с изоляцией на основе полиэфиров обладают хорошими электрическими и физико-механическими свойствами. К недостаткам проводов следует отнести пониженную стойкость к кратковременным тепловым перегрузкам (быстрое увеличение температуры до 180÷200 °С — так называемым "тепловым ударам").

Провода марки ПЭТВМ с изоляцией на полиэфирной основе предназначены для механизированной намотки электродвигателей. Для изолирования этих проводов применяется полиэфирный лак. Провода марки ПЭТВМ имеют несколько увеличенную толщину изоляции, что обеспечивает ее необходимую механическую прочность, которая требуется при механизированной намотке, так как при этом возникают дополнительные механические воздействия на провода (растяжение, многократные перегибы, удары, рывки, трение о металлические поверхности и т.п.).

Для прошивки матриц вычислительных устройств применяются эмалированные провода с двойной упроченной изоляцией на основе полиуретанов и полиамидов марки ПЭВТЛК. Эти провода могут иметь разную расцветку. Отличительной чертой проводов является исключительно высокая механическая прочность изоляции на истирание, а также способность облуживаться без предварительного удаления изоляции за 3—5 с.

Провода марки ПЭТКД также имеют ТИ 130 °С и предназначены для изготовления бескаркасных

катушек, применяемых в отклоняющих системах телевизоров. Провода имеют двухслойную изоляцию: основной слой на основе полиэфиримидного лака и клеящий на основе полиамидиого лака. После намотки катушки и нагрева изоляция провода слипается и образует монолит, сохраняющийся при любой форме изделия, например в катушке седловидной формы.

С полиэфирной изоляцией выпускаются и немагнитные провода марки ПЭТВ-БЖ, которые отличаются от остальных проводов этого типа миимальным количеством магнитных включений.

Для систем изоляции с ТИ 155 °С (класс нагревостойкости F) применяются эмалированные провода марок ПЭТ-155, ПЭТМ-155 и ПЭФ-155.

Провод марки ПЭТ-155 предназначен для массового применения в электромашиностроении. Провод изолирован лаком на полиэфиримидной основе, обладает высокой стойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами. Однако механические свойства изоляционного слоя недостаточио высоки, что не позволяет использовать провода для механизированной намотки. Для механизированной намотки рекомендуется использовать провод марки ПЭТМ-155 с изоляцией на полиэфирцианураТимидной или полиэфирамидимидной основе либо провод марки ПЭФ-155 с изоляцией на полиэфирцианураТимидной основе. Последний провод обладает также повышенной стойкостью к действию холодильных агентов (хладона-12, хладона-22) и различных масел, применяемых в холодильных агрегатах, а также трансформаторного масла.

Провода марки ПЭТ-200 с изоляцией на основе полиамидимидов обладают высокими электрическими и физико-механическими параметрами и имеют ТИ 200 °С.

Полиамидимидная изоляция используется также в качестве верхиего слоя в проводах марки ПЭТД-180. Основной слой изоляции этих проводов, имеющих ТИ 180 °С, выполняется на основе полиэфиримидного лака.

Для эксплуатации в системах изоляции с ТИ 220 °С рекомендуется провод марки ПНЭТ-имид, имеющий биметаллическую жилу медь-никель (никель наносится гальваническим способом) и изоляционную плеику на основе полиамидного лака. Провод обладает высокой нагревостойкостью, стойкостью к тепловому удару, хорошими электроизоляционными свойствами, однако имеет пониженную механическую прочность изоляции на истирание, что ограничивает области его применения.

Прямоугольные медные эмалированные провода изготовляются с сечением токопроводящих жил до 30 мм^2. Провода эмалируются: поливинилацеталевыми лаками — провода марки ПЭМП, полиэфирными лаками ПЭТВП, полиэфиримидными — ПЭТП-155, полиамидимидными — ПЭТ-200 и полиимидными — ПНЭТП.

Эмалированные алюминиевые провода находят ограниченное применение. Эмалирование этих проводов производится в основном поливинилацеталевыми и полиэфирными лаками. Провода маркируются ПЭВА и ПЭТВА. Электрические и физико-механические свойства изоляции алюминиевых проводов и медных находятся примерно на одном уровне, однако нагревостойкость алюминиевых проводов несколько выше.

Эмалированные провода из сплавов сопротивления находят применение в приборостроении, радиотехнике и других областях техники. Для эмалирования этих проводов применяется в основном поливинилацеталевый лак "винифлекс" — провода марок ПЭВКТ, ПЭВКМ, ПЭВМТ, ПЭВММ и ПЭВНХ. В качестве проводникового материала для указанных марок проводов применяются соответственно константан твердый и мягкий, а также нихром. Провода, эмалированные полиэфирным лаком ПЭ-943, имеют маркировку ПЭТВКТ и ПЭТВКМ.

20.18. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА С ВОЛОКНИСТОЙ, ЭМАЛЕВО-ВОЛОКНИСТОЙ, БУМАЖНОЙ И ПЛЕНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией применяются для изготовления обмоток электродвигателей, генераторов, трансформаторов и других электротехнических изделий при повышенных нагрузках на провод в процессе изготовления и эксплуатации. Для обмотки проводов применяются хлопчатобумажное волокно (провод марки ПЭБО), волокна из натурального шелка (провод марки ПЭШО), а также синтетические (лавсановые и капроновые) волокна (провода марок ПЭЛО, ПЭКО, ПЭКД, ПЭВТЛЛО). Выпускаются также провода марки ПЭШКО, в которых поверх эмалевого покрытия наложен слой комбинированных нитей из натурального шелка и капрона. Хлопчатобумажное волокно обладает хорошей стойкостью к истирающим нагрузкам, однако оно достаточно гигроскопично и имеет значительную толщину. Волокна из натурального шелка имеют меньшую толщину, стойки к истирающим усилиям, однако стоимость волокон высока, поэтому более широкое применение находит изоляция из синтетических нитей (лавсан, капрон). Слой эмали существенно улучшает электрические свойства изоляции проводов.

Провода с волокнистой изоляцией имеют двойную обмотку из хлопчатобумажного (провод марки ПБД) или шелкового волокна (провод марки ПШД). Выпускаются также алюминиевые обмоточные провода марки АПБД с изоляцией из двух слоев хлопчатобумажной пряжи. Электроизоляционные характеристики проводов с одной волокнистой изоляцией невысоки, поскольку они определяются в основном воздушными промежутками в изоляции. Указанные провода в изделиях, как праавило, подвергаются пропитке электроизоляционными лаками.

Провода с бумажной изоляцией применяются в основном для обмоток масляных трансформаторов. Изоляция медных проводов марки ПБ и алюминиевых марки АПБ выполняется путем обмотки кабельиой бумагой толщиной не более 0,12 мм или телефонной бумагой. Для высоковольтных трансформаторов используются провода с усиленной бумажной изоляцией марки ПБУ и АПБУ. В этом случае в качестве изоляции используется трансформаторная высоковольтная уплотненная бумага. Для мощных силовых трансформаторов и реакторов выпус-

каются провода ПТБ и ПТБУ, которые скручиваются из эмалированных прямоугольных проволок, а снаружи обматываются несколькими слоями кабельной бумаги. При скрутке производится транспонирование отдельных проволок в сечении по длине провода. Применение таких проводов позволяет снизить потери в обмотках примерно на 20% за счет уменьшения потерь от вихревых токов и от уравнительных токов в параллельных ветвях.

В качестве эмалевого покрытия используется маслостойкая поливинилформалевая изоляция.

Температурный индекс проводов с бумажной и эмалево-бумажной изоляцией составляет 105 °С, за исключением проводов марок ПТБн и ПТБУн, ТИ которых составляет 120 °С. Они используются для изготовления обмоток высоковольтных масляных трансформаторов с повышенным ресурсом работы.

Высокочастотные обмоточные провода находят применение в обмотках приборов, радиоустройств и других установок, работающих при высоких частотах. Для уменьшения дополнительных потерь от поверхностного эффекта и эффекта близости жилы проводов скручиваются из отдельных эмалированных проволок. Выпускаются провода, отдельные проволоки в которых эмалируются масляной эмалью, а общая изоляция состоит из одной или двух обмоток натуральным шелком (провода марок ЛЭШО и ЛЭШД) либо лавсановой пряжей (провода марок ЛЭЛО и ЛЭЛД). Провода марки ЛЭП скручиваются из отдельных проволок, эмалированных полиуретановым лаком. Эти провода не имеют обмотки пряжей. Если такие провода обматываются капроновыми нитями, то они маркируются ЛЭПКО.

Токопроводящие жилы таких проводов могут содержать от 7 до 1100 изолированных проволок и работать при частотах до 100 кГц. Для обмоток повышенной нагревостойкости используются провода марок ЛЭТЛО и ЛЭНП. В последних отдельные проволоки изолированы полиэфиримидной эмалью. Эти провода предназначены для работы в системах изоляции с ТИ 155 °С.

У погружных электродвигателей, применяемых в насосах, предназначенных для перекачки нефти, а также воды из артезианских скважин и т.п., обмотка непосредственно подвергается воздействию перекачиваемой жидкости.

Поэтому изоляция обмоточных проводов таких типов должна обладать достаточной герметичностью и выполняется из фторопластовой или полиимидно-фторопластовой пленки.

Обмоточные провода марок ППФИ-F и ППФИ-К предназначены для намотки погружных водонаполненных электродвигателей с рабочим напряжением до 380 В, работающих в воде при температуре до 180 °С и давлении до 20 МПа. Провода марки ППФИ-К за счет конструкции изоляции имеют наружное полиимидное покрытие и поэтому используются в системах изоляции, подвергающихся пропитке или компаундированию. Для изоляции применяются последовательно наложенные методом обмотки неориентированные фторопластовые и полиимидно-фторопластовые (с одно- или двухсторонним покрытием) пленки. Изоляция подвергается термообработке при температуре 370÷410 °С с целью спекания и герметизации.

Для намотки статоров погружных маслозаполненных электродвигателей используются провода с пленочной полиимидно-фторопластовой и эмалево-пленочной изоляцией.

Провода предназначены для эксплуатации при температуре 200 °С.

Для проводов марок ППИ-У и ППИ используются полиимидно-фторопластовые пленки различных типов, для ПЭИ-200 — комбинация эмалевого покрытия на основе полиамиднмидного лака и полиимидно-фторопластовой плеики.

Прямоугольные провода с изоляцией из полиимидно-фторопластовой пленки применяются для изготовления обмоток электродвигателей, эксплуатируемых в тяжелых условиях при температурах до 200 °С, в частности, тяговых электродвигателей для электровозов, электродвигателей для большегрузных самосвалов и т.п. Провода марок ППИПТ, ППИП-1 и ППИП-2 не могут использоваться в условиях пропитки обмотки лаками или компаундирования. В последнем случае используются провода марок ППИПКТ, ППИПК-1, ППИПК-2 и ППИПК-3, в которых верхний слой изоляции имеет полиимидное покрытие.

20.19. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА СО СТЕКЛОВОЛОКНИСТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Наиболее распространенными проводами со стекловолокнистой изоляцией являются медные провода, изолированные двумя слоями стеклянного волокна, пропитанного глифталевым (провод марок ПСД) или кремнийорганическим (провода марок ПСДК-Л) лаками. Провода с уменьшенной толщиной изоляции маркируются ПСДТ, ПСДКТ и т.д. Для обмотки этих проводов применяется утоненное стекловолокно. Провода с лакированной поверхностью имеют индекс Л. Выпускаются также провода с эмалево-стекловолокнистой изоляцией марок ПЭТВСД, ПЭТВСДТ и ПЭТСД. Эти провода используются для тяговых электродвигателей, обмотки которых находятся в тяжелых эксплуатационных условиях. Изоляция состоит из слоя полиэфирной и полиэфиримидной эмали и двухслойной обмотки стекловолокном с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком.

Нагревостойкость проводов со стекловолокнистой изоляцией в зависимости от пропиточного лака соответствует ТИ 155 °С (провода марок ПСД-Л, ПСДТ, ПЭТВСД) или ТИ 180 °С (провода марок ПСДК-Л, ПСДКТ).

Выпускаются также обмоточные провода с изоляцией из стеклоэфирных нитей (марки ПСЛД, ПСЛДТ — ТИ 155 °С и ПСДК и ПСЛДКТ — ТИ 180 °С), при производстве и применении которых резко снижается образование в воздухе стеклянной пыли и улучшаются условия труда. Стеклополиэфирная изоляция используется и для проводов с эмалево-стекловолокнистой изоляцией (марка ПЭТВСЛД).

Круглые и прямоугольные алюминиевые провода со стекловолокнистой изоляцией марки АПСД имеют ТИ 155 °С (пропитка изоляции осуществляется глифталевым лаком).

Выпускаются также алюминиевые провода марки АПСЛД с изоляцией из стеклополиэфирной нити.

Для увеличения нагревостойкости проводов используют биметаллические проводники (например, биметаллический проводник медь—никель). Никелевое покрытие защищает медь от окисления при высоких температурах. Провода с биметаллической жилой имеют марку ПНСДК.

Для эксплуатации при 500÷600 °С предназначены провода марки ПОЖ. В качестве проводника этих проводов используется биметаллическая проволока медь—никель; для изоляции применяется стекловолокно на кремнийорганическом замасливателе, пропитанное органосиликатными материалами. Провода марки ПОЖ предназначены для эксплуатации при 300 °С в течение 12 000 ч, при 500 °С в течение 500 ч и при 600 °С в течение 150 ч.

Провода марки ПОЖ выпускаются круглые в диапазоне диаметров 0,315÷3,0 мм и прямоугольные с размерами a = 0,9÷3,55 мм и b = 2,12÷10,6 мм. Номинальная удвоенная толщина изоляции 0,28÷0,36 мм для круглых проводов и 0,35÷0,62 мм для проводов прямоугольного сечения.

20.20. ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

В оптических кабелях в качестве каналов для передачи информации вместо традиционных для кабельной техники медных проводников используются кварцевые волокна, полученные методом химического осаждения стекла из газовой фазы. В качестве исходных материалов для получения таких стекол используются тетрахлориды кремния, германия и других элементов высокой степени чистоты.

Кварцевые волокна обладают низкими потерями, определяемыми коэффициентом затухания, и позволяют передавать информацию в широком спектре частот. Поэтому переход к использованию кварцевых волокон позволяет резко увеличить объемы передаваемой информации.

Оптические кабели по сравнению с обычными имеют меньшую массу и размеры, позволяют экономить остродефицитные материалы, дают возможность передавать большие потоки информации, обладают повышенной защищенностью и т.д. Благодаря этому оптические кабели находят широкое применение также в автоматизированных системах управления, в том числе энергетических при наличии сильных электромагнитных полей и высоких напряжениях. Одной из основных зон применения оптических кабелей являются системы дальней, зоновой, городской, межобъектовой и внутриобъектовой связи.

По конструктивному исполнению оптические кабели в основном делятся на две группы: кабели модульной конструкции, когда каждое волокно расположено в защитной трубке (рис. 20.26, *а*), и кабели с профилированным сердечником, когда оптические волокна уложены в спиральные пазы полимерных сердечников (рис. 20.26, *б*).

Все оптические кабели имеют климатическое исполнение В по ГОСТ 15150-69 (для всех районов на суше и на море, кроме районов с очень холодным климатом) или О (то же, но только на суше) при

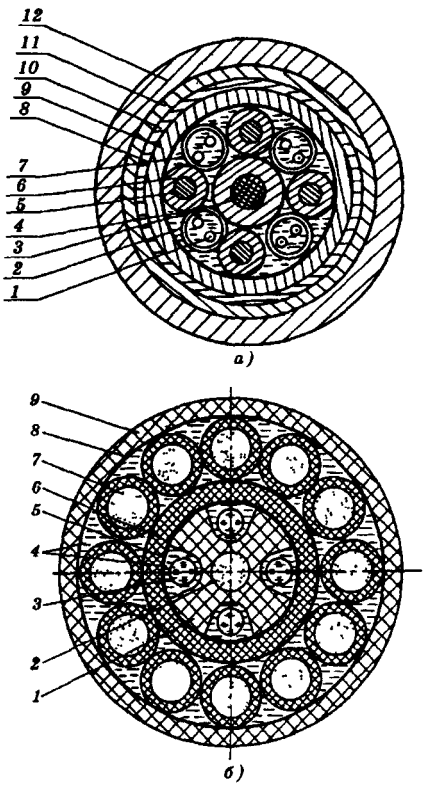


Рис. 20.26. Конструкция оптических кабелей

а — с модульным сердечником: *1* — оптическое волокно; *2* — оболочка оптического модуля; *3* — центральный силовой элемент из стеклопластикового стержня; *4* — оболочка; *5* — медная жила; *6* — изоляция медной жилы; *7* — гидрофобное заполнение, *8* — скрепляющая лента, *9* — промежуточная оболочка из полиэтилена; *10* — подушка из крепированной бумаги; *11* — стальная ленточная броня; *12* — наружная оболочка из полиэтилена, *б* — с профилированным сердечником: *1* — центральный профилированный элемент; *2* — упрочняющие нити; *3* — оптическое волокно; *4* — гидрофобное заполнение, *5* — скрепляющая лента; *6* — защитная оболочка из поливинилхлоридного пластиката; *7* — армирующий элемент, *8* — скрепляющая лента; *9* — защитная оболочка из полиэтилена

категории размещения 1 (на открытом воздухе) или 4 (в помещениях).

Кабели городской связи (линейные и станционные) применяются в качестве соединительных линий между городскими автоматическими телефонными станциями и узлами связи, а также для работы в помещениях телефонных станций. Они рассчитаны на короткие расстояния (5÷10 км) и большое число каналов. Такие линии эксплуатируются без промежуточных регенераторов сигнала (усилителей). Эти кабели могут иметь как модульную конструкцию, так и конструкцию с профилированным сердечником (кабели типа ОК и ОН). Кабели модульной конструкции имеют от четырех до восьми многомодовых волокон, каждое из которых уложено свободно в полимерную трубку, скручиваются вместе с упрочняющими элементами в сердечник, поверх которого накладывается оболочка из поли-

этилена. С целью защиты кабеля от проникновения воды сердечник заполняется гидрофобной массой. Кабель предназначен для прокладки в канализации. Основные характеристики таких кабелей: коэффициент затухания не более 3 и 5 дБ/км на длине волны 0,85 мкм; коэффициент широкополосности кабелей с коэффициентом затухания до 5 дБ/км — не менее 250 МГц·км, с коэффициентом затухания до 3 дБ/км — не менее 500 МГц·км.

Эффективная числовая апертура волокна 0,20±0,02.

Кабели выдерживают 20 изгибов на угол ±90° при радиусе изгиба до 250 мм (линейные) и 90 мм (станционные), а также 10 осевых закручиваний на угол 360°. Кабели предназначены для эксплуатации при температуре от —40 до 55 °С (линейные) и от —10 до 55 °С (станционные). Линейные кабели предназначены для прокладки в телефонной канализации, трубах, блоках и коллекторах.

В случае применения стержня из стеклопластика в качестве центрального силового элемента в пространство между модулями могут быть введены две медные жилы для служебной связи.

В настоящее время городская телефонная связь переводится на использование длины волны 1,3 мкм. В этом случае городские оптические кабели (типа ОКК и ОКС) имеют конструкцию с профилированным сердечником, причем в этих кабелях могут использоваться не только одномодовые, но и многомодовые волокна. Такие кабели могут иметь металлические оболочки и броню. Количество волокон от 4 до 16. Коэффициент затухания одномодовых волокон в этом случае фактически составляет 0,32÷0,4, многомодовых — 0,7÷1,0 дБ/км. Коэффициент широкополосности многомодового оптического волокна ие менее 1000 МГц·км. Дисперсия одномодового оптического волокна не более 3,5 пс(нм·км).

Кабели, предназиаченные для эксплуатации на длине волны 1,3 мкм, имеют фактически такую же стойкость к изгибам и перемоткам и такие же температурные пределы эксплуатации, как и городские оптические кабели, рассчитанные на длину волны 0,85 мкм. Ряд конструкций кабелей, предназначенных для прокладки в закрытых помещениях, имеют оболочки, не распространяющие горение.

Выпускаются также кабели типа ОКК/ОК, предназиаченные для эксплуатации в местных телефонных сетях и состоящие из параллельно расположенных сердечника с 30÷300 парами медных жил с полиэтиленовой изоляцией и оптической модульной четверки с гидрофобным заполнением (число оптических волокон от одного до восьми) в оболочке из полиэтилена. Кабели предназначены для прокладки в кабельной канализации, в коллекторах, шахтах, по стенам зданий и подвески с применением троса и бандажа на воздушных линиях связи (подвеска допускается для кабелей емкостью до 100 пар включительно). Коэффициент затухания оптических волокон в этих кабелях на длине волны 1,3 мкм 0,7+1,0 дБ/км при коэффициенте широкополосности соответственно 800÷500 МГц·км, на длине волны 0,85 мкм — 3÷5 дБ/км при коэффициенте широкополосности 500÷250 дБ/км.

Зоновые и магистральные оптические кабели предназначаются для передачи информации на значительные расстояния (сотни километров) и имеют большое количество каналов. Эти кабели должны обладать малым затуханием и высокой информационно-пропускной способностью. Зоновые и магистральные оптические кабели типа ОКЛ и ОКС имеют конструкцию либо с центральным силовым элементом из стеклопластикового стержня, вокруг которого скручены оптические модули с гидрофобным заполнением, либо с центральным профилированным элементом, армированным стеклопластиковым стержнем, в пазы которого уложены оптические волокна с гидрофобным заполнением. Силовой элемент может выполняться также из синтетических нитей, стальных проволок, стальных лент или стеклопластиковых стержией. Защитная оболочка — из полиэтилена или поливинилхлоридного пластиката. Кабели такого типа по требованию потребителя могут изготовляться с защитной оболочкой, не распространяющей горение. Коэффициент затухания на рабочей длине волны 1,55 мкм не более 0,3 дБ/км, на длине 1,3 мкм — не более 0,7 дБ/км. Дисперсия на длине волны 1,55 мкм 2,0 и 3,5 пс/(нм·км).

Механические характеристики кабелей и температурные условия эксплуатации такие же, как и для других типов кабелей, однако в случае, если станционный магистральный или внутризоновый кабель эксплуатируется в необслуживаемом регенерационном пункте, он должен выдерживать воздействие температур от —40 до 55 °С.

Строительная длина магистральных и внутризоновых кабелей не менее 2000, станционных — не менее 300 м.

Магистральные и зоновые кабели могут выпускаться также с использованием оптических волокон лучших зарубежных фирм. В этом случае кабели с одномодовым волокном со смещенной дисперсией имеют затухание 0,22÷0,25 дБ/км на длине волны 1,55 мкм.

Выпускаются также оптические кабели, предназначенные для эксплуатации на опорах линий электропередачи и электрифицированных участках железных дорог. Так, в частности, выпускается 12-волоконный оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос. В кабеле используется одномодовое волокно с затуханием до 0,35 дБ/км на длине волны 1,3 мкм и до 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм. Кабель рассчитан на работу при температурах до —60 °С. Допустимое растягивающее усилие кабеля при относительном удлинении 0,5 % составит 55 000 Н. Выпускаются также несколько типов подвесного оптического кабеля, предназначенного для прокладки на опорах линий электропередачи 110 кВ и на столбах городского освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

20.1. Белорусов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Под ред. Н.И. Белорусова. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1987.

20.2. Основы кабельной техники / Под ред. В.А. Привезенцева. 2-е изд. М.: Энергия, 1975.

Раздел 21

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ИЗОЛЯТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

21.1. Общие требования к электроизоляционным конструкциям 48
Общие сведения (48). Изоляция внешняя и внутренняя (48). Требования к электрической прочности изоляторов (49).
21.2. Электрическая прочность типовых электроизоляционных промежутков. . . 52
Общие сведения (52). Газовые промежутки (52). Воздушные промежутки вдоль поверхности изолятора (53). Промежутки в масле вдоль поверхности твердого диэлектрика (54). Бумажно-масляная изоляция (55). Электрическая прочность фарфоровых изделий (55).
21.3. Изоляторы переменного тока на напряжение свыше 1000 В 55
Классификация изоляторов (55). Опорные изоляторы (56). Проходные изоляторы (58). Линейные изоляторы (62) Изоляторы для электрифицированных железных дорог (68).
21.4. Высоковольтные вводы на напряжение 110 кВ и выше 68
21.5. Расчеты изоляторов 71
Общие сведения (71). Расчет механической прочности изоляторов (71). Расчет опорного изолятора (71). Электрический расчет ввода с бумажно- масляной изоляцией (72).
Список литературы 74

21.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические изоляторы и сооружения из них представляют собой самостоятельные конструкции, используемые в распределительных устройствах, на линиях электропередачи или в различного рода электротехнических установках, а также конструкции, входящие в состав многих электрических аппаратов. Во всех случаях изоляторы выполняют определенные функции: с их помощью осуществляется механическое крепление токоведущих частей, работающих под высоким напряжением, в некоторых случаях передается механическое движение, например от привода к подвижному контакту коммутационного аппарата.

Как элементы механического крепления изоляторы обеспечивают необходимое взаимное расположение токоведущих, заземленных и других частей установки и тем самым требуемый уровень электрической прочности изоляционных промежутков на всех участках.

Основные характеристики изоляторов: габариты, масса, стоимость — существенно влияют на общие технико-экономические показатели установки в целом. Это влияние резко усиливается с увеличением номинального напряжения. В установках сверхвысокого напряжения характеристики изоляторов могут иметь решающее значение, от них может зависеть целесообразность создания всей установки.

Изоляторы, работающие в составе электротехнической установки, подвергаются электрическим, механическим и тепловым воздействиям, а также воздействиям, обусловленным контактами с окружающей средой. Комплекс этих воздействий определяет условия работы изоляторов и их поведение в эксплуатации.

ИЗОЛЯЦИЯ ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ

В любом изоляторе или изоляционной конструкции можно выделить [21.1; 21.2]:

внешнюю изоляцию — изоляционные промежутки в атмосферном воздухе, в том числе и промежутки вдоль поверхностей изоляторов;

внутреннюю изоляцию — изоляционные промежутки, заполненные газообразными, жидкими или твердыми диэлектрическими материалами или их комбинацией, но не атмосферным воздухом.

Целесообразность выделения в изоляционной конструкции внешней и внутренней изоляции обусловлена специфическими особенностями соответствующих изоляционных промежутков, существенными различиями в методах их проектирования и испытания.

На электрическую прочность внешней изоляции сильное влияние оказывают атмосферные условия. Разрядные напряжения чисто воздушных промежутков зависят от давления, температуры и влажности воздуха, а характеристики промежутков в воздухе вдоль поверхностей изоляторов — от количества и свойств загрязнений на этих поверхностях.

Факторы, влияющие на интенсивность загрязнения поверхности изолятора, свойства слоя загрязнения и в итоге на разрядное напряжение, сильно зависят от местных условий и могут изменяться в широких пределах. Поэтому при проектировании внешней изоляции конструкции наружной установки необходим строгий учет атмосферных условий в конкретной заданной области.

Особенность внешней изоляции состоит также в том, что ее электрическая прочность после пробоя

или перекрытия и быстрого отключения может через короткое время восстановиться до исходного уровня. Поэтому в редких и особо неблагоприятных условиях можно допускать перекрытие внешней изоляции, а дальнейшую нормальную работу всей установки обеспечивать путем применения автоматического повторного включения (АПВ).

Электрическая прочность внутренней изоляции практически не зависит от атмосферных условий. Точнее, на поведение внутренней изоляции не влияют случайные и быстрые колебания температуры и влажности окружающего воздуха, если они не выходят за пределы допустимых значений; влияние оказывают только средние за относительно длительный период времени значения температуры и влажности окружающего воздуха.

Механизм пробоя внутренней изоляции может быть существенно разным при электрических воздействиях разной длительности. Соответственно разными являются и пробивные напряжения. Экспериментально установлено, что для многих видов внутренней изоляции пробивное напряжение при времени воздействия в несколько десятков микросекунд, характерном для грозовых перенапряжений, может в десятки раз превышать пробивные напряжения при воздействиях длительностью в несколько лет, соответствующих воздействию рабочего напряжения.

Полную информацию о внутренней изоляции дают так называемые *вольт-временные характеристики* — зависимости пробивного напряжения от длительности воздействия в диапазоне от микросекунд до десятков лет. Однако полное определение таких характеристик связано с большими затратами средств и времени. При проектировании внутренней изоляции оборудования энергосистем, в том числе и изоляторов, в соответствии с возможными в эксплуатации видами электрических воздействий пользуются данными:

о кратковременной электрической прочности при грозовых перенапряжениях, которые определяют экспериментально путем приложения к изоляции стандартных импульсов напряжения 1,2/50 (ГОСТ 1516.2-76*);

о кратковременной электрической прочности при внутренних перенапряжениях, которые получают экспериментально при приложении стандартных коммутационных импульсов напряжения 250/2500 или иной формы или при одноминутном воздействии напряжения промышленной частоты (ГОСТ 1516.2-76*);

о длительной электрической прочности как способности изоляции выдерживать непрерывное воздействие рабочего напряжения в течение требуемого срока.

Длительная электрическая прочность внутренней изоляции не может быть непосредственно измерена в лабораторном эксперименте. Ее оценивают косвенным путем, например по результатам измерения характеристик частичных разрядов (ГОСТ 20074-83).

При длительном воздействии рабочего напряжения не должно быть теплового пробоя внутренней изоляции. Напряжение теплового пробоя при прочих равных условиях зависит от тангенса угла диэлектрических потерь tgδ изоляции, характеризующего диэлектрические потери. Поэтому требование $U_{раб} < U_{т.проб}$, где $U_{т.проб}$ — напряжение теплового пробоя, определяет требование к tgδ изоляции.

Для всех видов внутренней изоляции характерны большие разбросы значений кратковременной и длительной электрической прочности; коэффициент вариации может быть 10—15% и более. Поэтому при проектировании внутренней изоляции пользуются так называемыми допустимыми значениями напряжений или напряженностей, которые соответствуют достаточно малым вероятностям пробоя. Допустимые значения напряжений и напряженностей определяют путем статистической обработки данных, затем их проверяют и уточняют по результатам эксплуатации изоляционных конструкций.

ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ

Изоляторы и изоляционные конструкции должны выдерживать без пробоя или перекрытия возможные в эксплуатации грозовые и внутренние перенапряжения. Конкретные требования к уровню электрической прочности изоляторов и изоляционных конструкций по отношению к перенапряжениям определяются значениями испытательных напряжений. Последние устанавливаются с учетом уровней перенапряжений в сетях разных классов напряжения и нормируются ГОСТ 1516.1-76*. Испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно, приведены в табл. 21.1.

В ГОСТ 1516.1-76* указывается, что пробивное напряжение внутренней изоляции изоляторов должно быть больше испытательного напряжения промышленной частоты для внешней изоляции в сухом состоянии не менее чем в 1,2 раза для изоляторов с внутренней жидкой или бумажно-масляной изоляцией и не менее чем в 1,6 раза для остальных изоляторов.

Для изоляторов, входящих в состав трансформаторов, реакторов или аппаратов и испытываемых совместно с ними, используются испытательные напряжения, установленные ГОСТ 1516.1-76* для соответствующего вида оборудования.

Требования к длительной электрической прочности внутренней изоляции изоляторов определяются наибольшим рабочим напряжением и необходимым сроком службы изолятора.

Требования к электрической прочности внешней изоляции изоляторов наружной установки по отношению к рабочему напряжению в условиях загрязнения и увлажнения определяются нормами на удельную, т.е. отнесенную к 1 кВ наибольшего рабочего линейного напряжения, длину пути утеч-

Таблица 21.1. Нормированные испытательные напряжения изоляторов с нормальной изоляцией, испытываемых отдельно (от трансформаторов, реакторов и аппаратов), кВ

Класс напряжения оборудования, кВ	Напряжение грозовых импульсов для испытания внешней изоляции					Напряжение коммутационного импульса для испытания внешней изоляции в сухом состоянии и под дождем	Кратковременные напряжения промышленной частоты							
	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)		шинных опор		вводов для нейтрали		одноминутное для испытания внутренней изоляции			для испытания внешней изоляции				
										в сухом состоянии			под дождем	
	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс	Срезанный импульс	Полный импульс		изоляторов (кроме вводов)	вводов для трансформаторов, реакторов и аппаратов	вводов для нейтрали	изоляторов (кроме шинных опор и вводов для нейтрали)	шинных опор	вводов для нейтрали	изоляторов (кроме вводов для нейтрали)	вводов для нейтрали
3	44	52	42	50	—	—	24	24	—	27	26	—	20	—
6	60	73	57	70	—	—	32	32	—	36	34	—	26	—
10	80	100	75	90	—	—	42	42	—	47	45	—	34	—
15	105	125	100	120	—	—	55	55	—	63	60	—	45	—
20	125	158	120	150	—	—	65	65	—	75	70	—	55	—
24	150	185	140	175	—	—	75	75	—	85	80	—	65	—
27	170	210	160	200	—	—	80	80	—	95	90	—	70	—
35	195	240	185	230	—	—	95	95	—	110	105	—	85	—
110	480	600	460	570	200	—	230	265	130	295	280	135	215	114
150	660	825	630	785	275	—	300	340	180	375	355	195	290	155
220	950	1190	900	1130	400	—	440	490	265	550	520	280	425	215
330	1200	1400	1150	1350	—	950	560	630	—	700	670	—	550	—
500	1600	1950	1600	1950	—	1300	760	800	—	900	900	—	740	—
750	2100	2550	—	—	—	1550	—	800	—	1000	—	—	900	—
1150	2900	3200	—	—	—	2100	1150	1150	—	1300	—	—	1300	—

Примечание. Испытательные напряжения для изоляторов всех классов напряжения, кроме 750 и 1150 кВ, нормированы ГОСТ 1516.1-76*; для 750 кВ указаны испытательные напряжения по ГОСТ 20690-75 для силовых трансформаторов.

Таблица 21.2. Удельная длина пути утечки по поверхности внешней изоляции электроустановок переменного тока на напряжение 3 750 кВ (по ГОСТ 9920-89)

Степень загрязненности	Удельная длина пути утечки, см/кВ, не менее
I — легкая	1,6
II — средняя	2,0
III — сильная	2,5
IV — очень сильная	3,1

Примечание. В районах с незначительным загрязнением в зависимости от эксплуатационных условий можно использовать удельную длину пути утечки менее 1,6 см/кВ, но не менее 1,2 см/кВ.

ки по поверхности изолятора. Эти нормы, установленные ГОСТ 9920-89, приведены в табл. 21.2.

Внешняя изоляция изоляторов воздушных линий и открытых распределительных устройств должна соответствовать требованиям Инструкции [21.4]; для нее должно соблюдаться условие

$$L_э \geq \lambda_э U,$$

где $L_э$ — эффективная длина пути утечки по поверхности изолятора; $\lambda_э$ — удельная эффективная длина пути утечки, нормированные значения которой приведены в табл. 21.3 и 21.4; U — наибольшее рабочее междуфазное напряжение.

Удельная длина пути утечки для изоляторов сетей с изолированной нейтралью должна быть несколько большей, чем для сетей с заземленной нейтралью, так как в сетях с изолированной

Таблица 21.3. Нормированная удельная эффективная длина пути утечки гирлянд изоляторов и штыревых изоляторов воздушных линий 6—750 кВ на металлических и железобетонных опорах (Инструкция ОРГРЭС)

Степень загрязненности	$\lambda_э$, см/кВ (не менее)	
	Сети с изолированной нейтралью при номинальном напряжении, кВ	Сети с эффективно заземленной нейтралью при номинальном напряжении, кВ
	6÷35	110÷750
I	2,20÷1,90	1,40
II	2,20÷1,90	1,60÷1,50
III	2,20	1,90÷1,80
IV	2,60	2,25
V	3,00	2,60
VI	3,50	3,10
VII	4,20	3,70

Примечание. Меньшие значения относятся к более высоким классам напряжения.

Таблица 21.4. Нормированная удельная эффективная длина пути утечки внешней изоляции электрооборудования открытых распределительных устройств 6—750 кВ (Инструкция ОРГРЭС)

Степень загрязненности	$\lambda_э$, см/кВ, не менее, при номинальном напряжении 6—750 кВ
I	1,70÷1,50
II	1,70÷1,50
III	2,20÷1,80
IV	2,60÷2,25
V	3,10÷2,60
VI	3,50÷3,10

Примечание. Меньшие значения относятся к более высоким классам напряжения.

нейтралью возможна длительная работа с замыканием одной фазы на землю, когда на изоляцию «здоровых» фаз действует линейное напряжение.

Понятие эффективной длины $L_э$ введено для того, чтобы учесть неравномерность распределения загрязнений по поверхности изолятора и возможность отрыва канала разряда от поверхности изолятора. Эффективная длина $L_э$ связана с геомтрической L длиной утечки соотношением $L_э = L/k$, где k—коэффициент эффективности, значения которого в зависимости от отношения геометрической длины пути утечки L к строительной длине H изоляционной конструкции приведены в табл. 21.5.

В принятой в Инструкции [21.4] классификации районов по степени загрязненности атмосферы к районам I степени относятся: лес, тундра, лесотундра, болота, луга, удаленные от промышленных и других источников загрязнения. К районам II степени загрязненности атмосферы принадлежат районы с сильно дефилирующими почвами и земледельческие районы, в которых применяются химические удобрения, гербициды и другие химические вещества, а также промышленные районы с низким уровнем загрязненности атмосферы. Районы III — IV степеней загрязненности — это районы, имеющие источники повышенной загрязненности в виде некоторых промышленных предприятий и тепловых электростанций, участков с засоленной почвой и водоемов с соленой водой. Правила определения степени загрязненности атмосферы с учетом названных источников и их особенностей, а также расстояния от источника загрязнения до места размещения высоковольтного оборудования изложены в Инструкции [21.4].

Таблица 21.5. Коэффициент эффективности k для внешней изоляции электрооборудоваиия распределительных устройств

L/H	1,5÷2,0	2,0÷2,3	2,3÷2,7	2,7÷3,2	3,2÷3,5
k	1,0	1,10	1,20	1,30	1,40

21.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИПОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Практически всю информацию об электрической прочности различных промежутков, составляющих внешнюю и внутреннюю изоляцию изоляторов, а также любых других высоковольтных изоляционных конструкций, до сего времени получают опытным путем. Инженерные методы расчета пробивных напряжений имеются только для газовых промежутков, физика разрядных процессов в которых изучена достаточно глубоко. Для внутренней изоляции, состоящей из жидких или твердых диэлектриков или их комбинации, пригодные для практики расчетные методики отсутствуют. Поэтому при проектировании изоляционных конструкций пользуются опытными данными о пробивных напряжениях.

Из-за высокой стоимости экспериментов, требующих разрушения крупных конструкций или макетов, часто возникает необходимость использования уже имеющихся для рассматриваемого вида изоляции данных, но полученных при иных значениях основных параметров (толщине изоляции, размерах электродов и др.). В таких случаях пользуются следующими приближенными выражениями:

при изменении площади электродов

$$\overline{U}_{\text{пр}} \approx \overline{U}_{\text{пр}\,0} - \frac{\delta}{\pi}\sigma_0 \ln S/S_0,$$

где S_0 — площадь электродов у конструкции, для которой имеются данные о среднем пробивном напряжении $\overline{U}_{\text{пр}\,0}$ и среднеквадратичном отклонении σ_0; S — площадь электродов у конструкции, для которой оценивается среднее пробивное напряжение $\overline{U}_{\text{пр}}$;

при изменении толщины d изоляции со слабонеоднородным электрическим полем

$$U_{\text{пр}} \approx U_{\text{пр}\,0}\frac{d}{d_0}\frac{k_{\text{н}\,0}}{k_{\text{н}}},$$

где $k_{\text{н}\,0}$ — коэффициент неоднородности электрического поля, т.е. отношение наибольшей в промежутке напряженности к средней напряженности, для изоляции при толщине d_0, для которой известно пробивное напряжение $U_{\text{пр}\,0}$; $k_{\text{н}}$ — коэффициент неоднородности электрического поля для изоляции при толщине d, для которой оценивается значение пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$;

при изменении толщины d изоляции с резконеоднородным электрическим полем

$$U_{\text{пр}} \approx U_{\text{пр}\,0}\left(\frac{d}{d_0}\right)^{0,5}.$$

Следует иметь в виду, что приведенные выше соотношения не являются универсальными и точными.

Электрическая прочность внутренней изоляции зависит не только от геометрических размеров, но и от ряда других факторов: режимов изготовления, свойств исходных материалов, условий работы или проведения опытов, методов измерения. По этой причине часто отмечаются значительные расхождения между данными для одной и той же изоляции, изготовленной на разных заводах или в разное время. В связи с этим необходим строгий анализ и отбор имеющихся опытных данных, во всех случаях требуется экспериментальная проверка вновь разработанной изоляционной конструкции.

Приводимые ниже сведения об электрической прочности изоляционных промежутков следует рассматривать как ориентировочные. Более подробные сведения имеются в рекомендуемой литературе.

ГАЗОВЫЕ ПРОМЕЖУТКИ

Для воздушных промежутков с однородным электрическим полем и идеально гладкими электродами пробивное напряжение, кВ (амплитудные значения) определяется выражением

$$U_{\text{пр}} = 24{,}5\,\delta l + 6{,}4\sqrt{\delta l},$$

где l — расстояние между электродами, см; $\delta = p\,T_0/(p_0\,T)$ — относительная плотность воздуха; p — давление, МПа; T — температура, К; $p_0 = 0{,}1$ МПа; $T_0 = 293$ К.

Микронеровности на поверхности электродов приводят к снижению значения $U_{\text{пр}}$. При высокой чистоте обработки поверхностей электродов, $p \le 0{,}5$ МПа и $l > 1{,}0$ см снижение $U_{\text{пр}}$ составляет не более 10%.

Начальное напряжение (кВ, амплитудные значения) для воздушного промежутка между соосными цилиндрическими электродами идеальной гладкости

$$U_0 = 24{,}5\,\delta r_0\left[1 + \frac{0{,}65}{(\delta r_0)^{0,38}}\right]\ln\frac{R}{r_0},$$

где r_0 — радиус внутреннего электрода, см.; R — радиус наружного электрода, см.

Для резконеоднородных электрических полей напряжение U_0 соответствует напряжению $U_{\text{к}}$ зажигания короны, для слабонеоднородных полей — пробивному $U_{\text{пр}}$. Условия, при которых электрическое поле следует относить к слабо- или резконеоднородному, рассматриваются в [21.5]. Там же излагаются методы расчета начальных и разрядных напряжений для других систем электродов и смесей газов, анализируется влияние чистоты обработки поверхностей электродов.

Пробивные напряжения, кВ (амплитудные значения), для промежутков в виде соосных цилиндров, заполненных элегазом (SF_6 — шестифтористая сера) под давлением, можно определить по формуле

$$U_{\text{пр}} = 8{,}9\cdot 10^4\,pr \times$$

$$\times\left[1 + \frac{8{,}96\cdot 10^{-4}}{(pr)^{0,54}}\right]k_{\text{ш}}\,k_{\text{пов}}\ln\frac{R}{r},$$

где p — давление, МПа; r и R — радиус соответственно внутреннего и наружного цилиндрического электрода, м; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхно-

стей электродов, т. е. чистоты их обработки (при шлифованных поверхностях $k_ш = 0{,}8 \div 0{,}9$); $k_{пов}$ — коэффициент, учитывающий влияние площади поверхности электрода с наименьшим радиусом кривизны,

$$k_{пов} = 1 - 0{,}04 \ln 2 \cdot 10^3 \pi r l,$$

где l — длина цилиндрического электрода, м, радиусом r, м.

Завнсимость относительного пробивного напряжения смеси азота и элегаза от объемного содержания элегаза показана на рис. 21.1.

Зависимости разрядных напряжений от расстояния между электродами для воздушных промежутков с резконеоднородным электрическим полем (стержень — стержень, стержень — плоскость) при нормальных условиях (давление 0,1 МПа, температура 293 К, абсолютная влажность 11 г/м^3) при напряжениях частотой 50 Гц и импульсных приведены на рис. 21.2 — 21.5. При отклонении условий от нормальных изменение разрядных напряжений определяется с помощью поправок, которые вычисляются по методике, изложенной в ГОСТ 1516.2-76*.

Эмпирические формулы для расчета разрядных напряжений типовых воздушных промежутков приведены в [21.3].

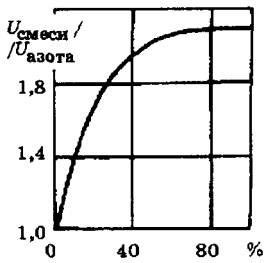


Рис. 21.1. Зависимость относительного пробивного напряжения смеси азот-элегаз от объемного содержания элегаза в смеси

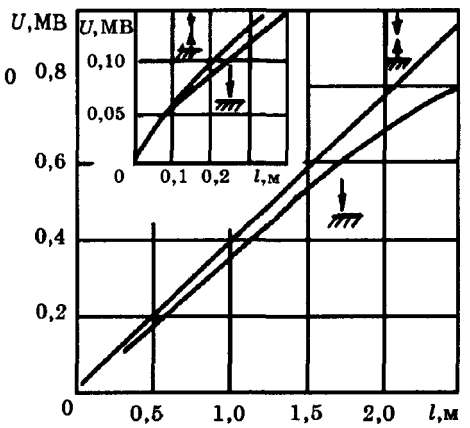


Рис. 21.2. Разрядные напряжения (действующие значения) для воздушных промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость при частоте 50 Гц

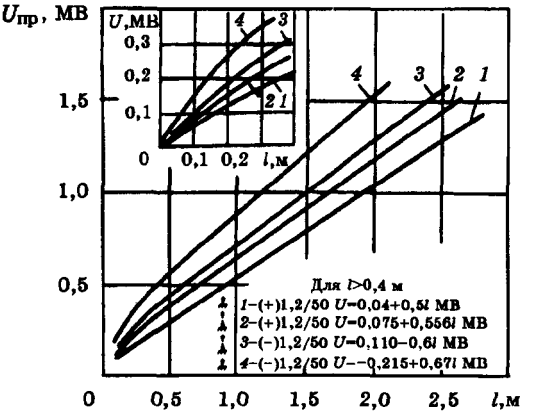


Рис. 21.3. Импульсные разрядные 50% напряжения для воздушных промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость

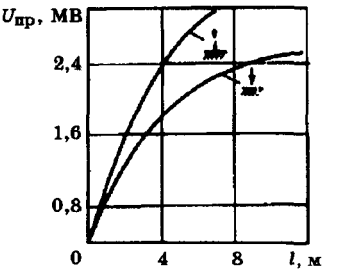


Рис. 21.4. Разрядные напряжения (амплитудные значения) для воздушных промежутков стержень—стержень и стержень—плоскость при частоте 50 Гц

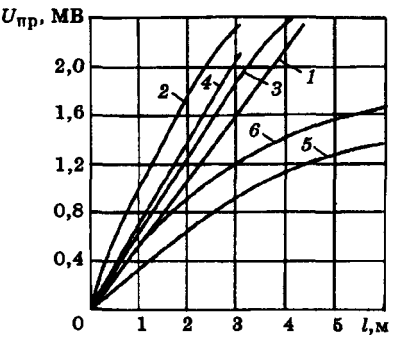


Рис. 21.5. Импульсные разрядные 50% напряжения для воздушных промежутков

1 — импульс 1,2/50, + стержень и − плоскость; *2* — то же, но − стержень и + плоскость; *3* — то же, но стержень—стержень при положительной полярности незаземленного стержня; *4* — то же, но стержень—стержень при отрицательной полярности незаземленного стержня; *5* — коммутационный импульс с длительностью фронта $\tau_ф$ = = 120 мкс, + стержень и − плоскость; *6* — то же, но $\tau_ф$ = 2500 мкс

ВОЗДУШНЫЕ ПРОМЕЖУТКИ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОЛЯТОРА

Разрядные напряжения в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика зависят от степени неоднородности электрического поля, расположения поверхности относительно силовых линий поля и состояния поверхности твердого диэлектрика.

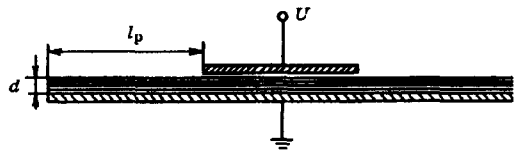


Рис. 21.6. Схема изоляции с резконеоднородным электрическим полем и преобладающей нормальной составляющей напряженности

В однородном поле, когда силовые линии направлены вдоль чистой и сухой поверхности, средняя разрядная напряженность зависит от гигроскопичности диэлектрика, влажности воздуха и плотности прилегания электродов к диэлектрику.

При резконеоднородном поле с преобладающей нормальной составляющей напряженности (схема изоляции показана на рис. 21.6) при напряжении $U_к$ в узкой области у края электрода возникает коронный разряд. Затем при напряжении $U_{ск} > U_к$ от края электрода начинают развиваться скользящие разряды, распространяющиеся на значительную часть разрядного расстояния $l_р$. С ростом приложенного напряжения длина скользящего разряда $l_{ск}$ быстро увеличивается. Когда $l_{ск}$ достигает $l_р$, происходит перекрытие.

Напряжения $U_к$ и $U_{ск}$, кВ, могут быть определены по формулам:

$$U_к = 3{,}0 \left(\frac{d}{\varepsilon_r}\right)^{0{,}45}; \quad U_{ск} = 26{,}5 \left(\frac{d}{\varepsilon_r}\right)^{0{,}45},$$

где d — толщина твердого диэлектрика, мм; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость этого диэлектрика.

Длина скользящего разряда $l_{ск}$ пропорциональна пятой степени воздействующего напряжения. Поэтому напряжение перекрытия $U_{пер}$ мало отличается от напряжения $U_{ск}$; выражением для $U_{ск}$ можно пользоваться для приближенной оценки напряжения перекрытия.

Для цилиндрического конденсатора с острыми краями электродов можно использовать приведенные выше формулы для $U_к$ и $U_{ск}$, однако при этом вместо толщины диэлектрика d следует подставлять величину $d' = R \ln R/r$, где r — радиус внутреннего электрода; R — радиус наружного электрода.

У стержневых и штыревых опорных изоляторов электрическое поле, как правило, получается резконеоднородным с преобладающей тангенциальной составляющей напряженности. При этом разрядные напряжения зависят от конструкции металлической арматуры, формы изоляционного тела, определяющей длину пути разряда в воздухе, и состояния поверхности изолятора. При проектировании изоляторов пользуются разрядными напряжениями, измеренными при сухом состоянии поверхности и при дожде нормированной интенсивности (см. ГОСТ 1516.2-76*). При сухом состоянии поверхностей измерения проводятся при

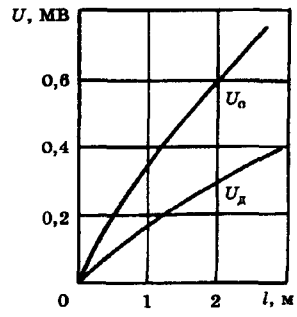


Рис. 21.7. Зависимость разрядного в сухом состоянии $U_с$ и разрядного под дождем $U_д$ напряжений вдоль гладкого без ребер фарфорового стержня от его длины l

напряжениях частотой 50 Гц и импульсном, под дождем — при напряжении частотой 50 Гц.

Влияние смачивания чистой поверхности дождем на разрядное напряжение видно из кривых на рис. 21.7.

При расчетах фарфоровых изоляторов пользуются следующими эмпирическими формулами:

выдерживаемые напряжения, кВ, при частоте 50 Гц в сухом состоянии для изоляторов:

штыревых $U_с = 15 + 0{,}395\, l_с$,

стержневых $U_с = 24 + 0{,}378\, l_с$,

опорных $U_с = 30 + 0{,}290\, l_с$,

проходных $U_с = (0{,}33 \div 0{,}43)\, l_с$;

выдерживаемые напряжения, кВ, при частоте 50 Гц под дождем для изоляторов:

штыревых $U_д = 0{,}25\, l_с$,

стержневых $U_д = 0{,}30\, l_с$,

проходных $U_д = (0{,}23 \div 0{,}26)\, l_с$;

импульсные 50% разрядные напряжения для изоляторов:

одноюбочных штыревых $U_{50\%} = 0{,}70\, l_с$,

многоюбочных штыревых $U_{50\%} = 30 + 0{,}54\, l_с$,

стержневых $U_{50\%} = 0{,}67\, l_с$,

проходных $U_{50\%} = (0{,}52 \div 0{,}60)\, l_с$.

В этих выражениях для разрядных напряжений $l_с$ — длина пути перекрытия в сухом состоянии, мм, которая ориентировочно определяется как наикратчайшее расстояние по воздуху между высоковольтным и заземленным электродами.

ПРОМЕЖУТКИ В МАСЛЕ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА

В слабонеоднородных полях, если граница раздела масло—твердый диэлектрик совпадает с силовыми линиями, наличие в промежутке твердого диэлектрика практически не влияет на разрядное напряжение. Если же граница раздела пересекает силовые линии, то влияние твердого диэлектрика может быть различным в зависимости от того, как присутствие твердого диэлектрика влияет на напряженность в области, прилегающей к поверхности твердого диэлектрика. Приближенная оценка влияния твердого диэлектрика в таких случаях

может быть произведена путем анализа электрического поля, точная — только по результатам экспериментов.

В резконеоднородных полях разряд в масле по поверхности твердого диэлектрика, как и в воздухе, имеет три стадии: начальные частичные разряды малой интенсивности (корона), скользящие разряды, полное перекрытие. Для изоляции конденсаторного типа по схеме рис. 21.6 напряжение появления скользящих разрядов $U_{ск}$, кВ, по поверхности обычно используемых в масле твердых изоляционных материалов (картона, бумаги и др.) определяется по формуле

$$U_{ск} = 13{,}8\, d^{0{,}45},$$

где d — толщина твердой изоляцин, мм.

Длина скользящих разрядов $l_{ск}$, мм, при напряжении, приложенном к изоляционной конструкции, кВ,

$$l_{ск} = \frac{U - U_{ск}}{1{,}28},$$

где $U > U_{ск}$.

Полное перекрытие разрядного промежутка в масле длиной $l_р$, мм, происходит при напряжении, кВ,

$$U_{пер} = U_{ск} + 1{,}28\, l_р.$$

Формула справедлива для $l_р > 50$ мм.

БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Бумажно-масляная изоляция (БМИ) является основной внутренней изоляцией во вводах на напряжения 110—750 кВ. Характеристики БМИ зависят от ее структуры, т. е. от взаимного расположения лент или полос бумаги в слоях, от качества бумаги и масла, а также от технологии изготовления: плотности намотки бумажного остова, режимов вакуумной сушки и пропитки маслом.

Во вводах на напряжение 110—750 кВ непременно используется регулирование электрического поля в БМИ с помощью дополнительных электродов — алюминиевых обкладок, закладываемых в бумажный остов при намотке. Эти обкладки образуют систему последовательно соединенных конденсаторов и разделяют БМИ на ряд относительно тонких слоев. БМИ в слое на участках, прилегающих к краям обкладок, работает в резконеоднородном поле (БМИ конденсаторного типа), в остальной части — в слабонеоднородном поле.

Для БМИ конденсаторного типа допустимые рабочие и испытательные напряженности выбираются исходя из следующих условий:

отсутствия при рабочем напряжении начальных частичных разрядов, медленно разлагающих масло и ограничивающих срок службы изоляции;

отсутствия при испытательном напряжении частотой 50 Гц критических разрядов, способных за короткое время испытания необратимо повредить изоляцию;

отсутствия при импульсных испытательных напряжениях пробоев или перекрытий по уступу (от края обкладки вдоль слоев бумаги) между обкладками.

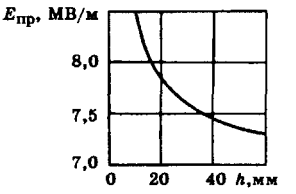


Рис. 21.8. Зависимость пробивной напряженности $E_{пр}$ фарфорового цилиндра от толщины его стенки h

При проектировании вводов для БМИ конденсаторного типа принимаются следующие средние по толщине допустимые напряженности МВ/м:

Испытательные при импульсах

1,2/50 $E_{имп.доп}$ . . . . . $40\, d^{-0{,}5}$ МВ/м, но не более 40 МВ/м

Испытательные при частоте

50 Гц $E_{исп.доп}$ . . . . . $12\, d^{-0{,}58}$ МВ/м, но не более 12 МВ/м

Рабочие $E_{раб.доп}$ . . . . . $4{,}0\, d^{-0{,}58}$ МВ/м, но не более 4,0 МВ/м

Здесь d — толщина слоя БМИ между обкладками, мм.

Средние по длине уступа допустимые напряженности (вдоль слоев бумаги), МВ/м, принимаются равными:

Испытательные при частоте 50 Гц	0,8—1,0
Испытательные при импульсах 1,2/50	1,8—2,0
Испытательные при коммутационных импульсах	1,5—1,7

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ФАРФОРОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Пробивные напряженности изоляционных изделий из фарфора существенно ниже тех, которые получают при испытаниях стандартных образцов малой толщины (28—30 МВ/м). Объясняется это особенностями технологии, приводящими к увеличению неоднородностей в фарфоре с ростом толщины его стенок. При расчетах изоляционных изделий в виде полых цилиндров значение пробивной напряженности, МВ/м, для высоковольтного фарфора можно определить по рис. 21.8 или по формуле

$$E_{пр} = 6{,}5 + 62\, h^{-0{,}5},$$

где h — толщина стенки фарфорового цилиндра, мм.

При нагреве выше 120 °С электрическая прочность фарфора определяется тепловым пробоем, пробивная напряженность резко снижается с ростом температуры.

21.3. ИЗОЛЯТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА НАПРЯЖЕНИЕ СВЫШЕ 1000 В

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛЯТОРОВ

По своему назначению изоляторы подразделяются на опорные, проходные и линейные с норми-

рованными соответствующим стандартом электрическими и механическими нагрузками.

В климатическом исполнении изоляторы изготовляют по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70 для районов умеренного (У), холодного (ХЛ), тропического (Т) и умеренно-холодного (УХЛ) климата.

Категории размещения изоляторов для работы в помещении 2, 3, 4, а для работы на открытом воздухе 1. В зависимости от степени загрязненности изоляторы выпускают с нормальной (категория А), усиленной (Б) и особо усиленной (В) внешней изоляцией, отличающейся длиной пути утечки (см. § 21.1) при прочих равных условиях.

Приведенные ниже электрические характеристики изоляторов соответствуют их установке не более чем 1000 м над уровнем моря. При эксплуатации изоляторов на высоте более 1000 м и при температуре выше 40 °С следует руководствоваться ГОСТ 1516.1-76* и ГОСТ 15150-69.

ОПОРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Опорные изоляторы предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах, распределительных устройствах электрических станций и подстанций, токопроводах и комплектных распределительных устройствах переменного напряжения частотой до 100 Гц по ГОСТ 15150-69.

Опорные изоляторы для работы в помещении изготовляют по ГОСТ 19797-85 на номинальное напряжение 6, 10, 20 и 35 кВ. Минимальная разрушающая сила на изгиб соответствует согласно ГОСТ 19797-85 следующему ряду: 3,75; 7,50; 20,0; 30,0 кН.

Климатическое исполнение опорных изоляторов У,УХЛ,Т категорий размещения 2, 3 и 4.

Изоляционная деталь изолятора из электротехнического фарфора (рис. 21.9) представляет собой тело вращения примерно конической формы с верхней и нижней полостями, внутрь которых заделана металлическая арматура. На торцевых поверхностях арматуры имеются резьбовые отверстия для крепления шин и монтажа изолятора. Для повышения разрядных напряжений изолятора на боковой поверхности имеется одно (для номинального напряжения $U_н$ = 6÷10 кВ), два (20 кВ) или три (35 кВ) небольших ребра [21.1].

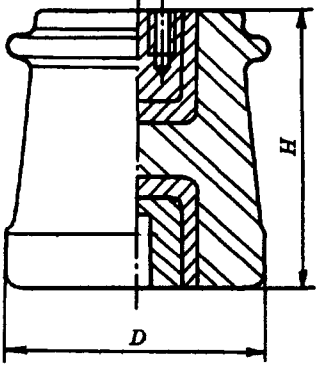


Рис. 21.9. Опорный изолятор категорий размещения 2, 3

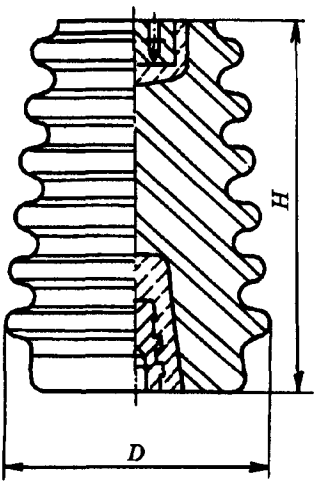


Рис. 21.10. Опорный изолятор с ребристой поверхностью категорий размещения 2, 3

На рис. 21.10 показана конструкция опорного изолятора с ребристой поверхностью, имеющего большую длину пути утечки, который предназначен для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью и загрязненностью воздуха.

Технические характеристики опорных изоляторов приведены в табл. 21.6 (ГОСТ 19797-85).

В условном обозначении типов изоляторов буквы и цифры означают: И — изолятор; О — опорный; Р — ребристый; первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая — минимальная разрушающая сила на изгиб (разрыв), кН; У, УХЛ, Т — климатическое исполнение; 2, 3 — категории размещения. Срок службы изоляторов не менее 30 лет при интенсивности отказов не более $1{,}10^{-7}$ 1/ч (ГОСТ 9984-85).

Вновь разработанная конструкция опорного изолятора, показанная на рис. 21.11, отличается от приведенных на рис. 21.9 и 21.10 конструктивно и нормированными параметрами (см. табл. 21.6). Отличается новый изолятор и условным обозначением, в котором буквы и цифры означают: И — изолятор; 4, 8, 16, 25 — минимальная разрушающая сила на изгиб (разрыв), кН; 80, 125, 170, 195 — испытательное напряжение грозового импульса, кВ; УХЛ — климатическое исполнение; 3, 4 — категория размещения.

Опорно-стержневые изоляторы для наружной установки состоят из сплошного фарфорового цилиндра с развитой боковой поверхностью, армированного верхним и нижним металлическими фланцами (рис. 21.12). Ввиду того что длина разрядного промежутка практически совпадает со строительной высотой изолятора, такие конструкции принято называть непробиваемыми.

Опорно-стержневые изоляторы выпускают по ГОСТ 9984-85 и ГОСТ 25073-81 на номинальные напряжения 10, 20, 35, 110 кВ, исполнения УХЛ, Т, категории размещения 1. Минимальная разру-

Таблица 21.6. Технические характеристики опорных изоляторов для работы в помещении

Условное обозначение типа изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее допустимое напряжение, кВ	Испытательное напряжение грозового импульса, кВ	Минимальная разрушающая сила на изгиб, P_0, кН	Высота изолятора H, мм	Номинальное значение максимального диаметра изолятора, мм	Масса, кг, не более	
							изоляционной части	арматуры
И4-80 УХЛ3	10	12,0	80	4	130	75	—	—
И8-80 УХЛ3				8		100	—	—
И16-80 УХЛ3				16		125	—	—
И25-80 УХЛ3				25		160	—	—
И4-125 УХЛ3	20	24,0 (25,0)	125	4	210	85	—	—
И8-125 УХЛ3				8		125	—	—
И16-125 УХЛ3				16		140	—	—
И25-125 УХЛ3				25		170	—	—
И4-170 УХЛ3	30	36,0	170	4	300	105	—	—
И8-170 УХЛ3				8		130	—	—
И4-195 УХЛ3	35	40,5	195	4	355	115	—	—
И8-195 УХЛ3				8		145	—	—
ИО-6-3,75 I УЗ	6	7,2	60	3,75	100	77	—	0,14
ИО-6-3,75 II УЗ							0,88	0,10
ИОР-6-3,75 УХЛ, Т2						84	0,94	0,14
ИО-10-3,75 I УЗ	10	12,0	80	7,50	120	82	1,23	—
ИО-10-3,75 II УЗ							—	0,12
ИОР-10-3,75 УХЛ, Т2						96	1,41	0,20
ИО-10-7,50 УЗ						102	1,76	0,40
ИОР-10-7,50 I УХЛ, Т2						115	2,30	0,38
ИОР-10-7,50 II УХЛ, Т2						112	1,98	—
ИОР-10-7,50 III УХЛ, Т2						115	2,20	0,55
ИО-10-20,00 УЗ				20,00	134	160	4,29	1,80
ИОР-10-20,00 УХЛ, Т2						170	4,95	1,70
ИОР-10-30,00 УХЛ, Т2				30,00	150	200	9,48	1,0
ИО-20-3,75 УЗ	20	24,0 (25,0)	125	3,75	210	110	5,50	0,30
ИОР-20-3,75 УХЛ, Т2						146		
ИОР-20-7,50 У, ТЗ				7,50	200	160		
ИО-20-30,00 УЗ				30,00	206	186	8,07	—
ИОР-20-30,00 УХЛ, Т2						206	10,30	4,30
ИО-35-3,75 УЗ	35	40,5	195	3,75	372	110	6,60	—
ИОР-35-3,75 УХЛ, Т2						148	10,78	0,40
ИО-35-7,50 УЗ				7,50		140	10,29	0,60
ИОР-35-7,50 УХЛ, Т2						148	10,78	0,80

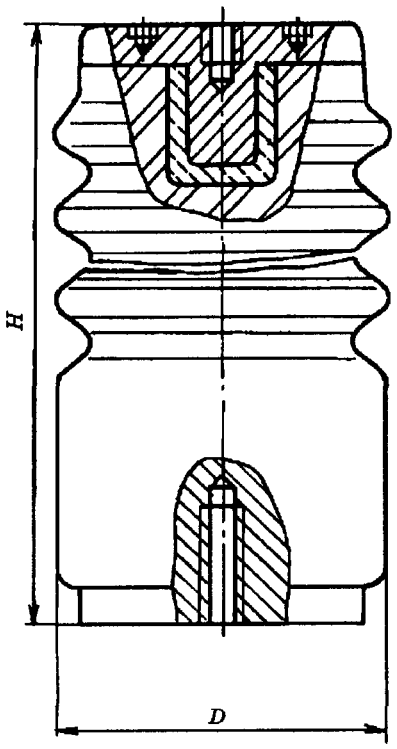


Рис. 21.11. Новая конструкция опорного изолятора для внутренней установки

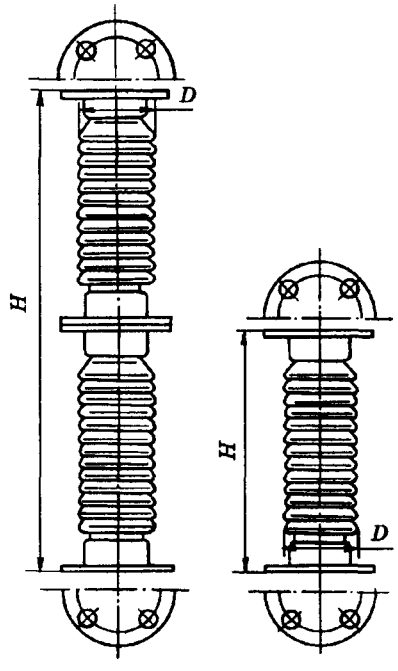


Рис. 21.12. Опорно-стержневой изолятор категории размещения 1

шающая сила на изгиб составляет 300, 400, 500, 600, 1000, 1250, 1500, 1600, 2000 даН.

Срок службы изоляторов не менее 25 лет.

Технические характеристики опорно-стержневых изоляторов приведены в табл. 21.7.

В условном обозначении типов изоляторов, буквы и цифры означают: И — изолятор; О — опорный; С — стержневой; первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая — минимальная механическая разрушающая сила на изгиб, даН (1 даН = 10 Н); третья — конструктивное исполнение; УХЛ,Т — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69; 1 — категория размещения.

Новые опорно-стержневые изоляторы в конструктивном отношении не отличающиеся от приведенного на рис. 21.12, имеют другие геометрические размеры и нормированные характеристики, представленные в табл. 21.8.

В условном обозначении новых типов изоляторов буквы и цифры обозначают: С — изолятор опорно-стержневой; 4; 6; 8; 10; 11; 12,5; 16; 20 — минимальная разрушающая сила на изгиб, кН; 80; 125; 170; 200; 250; 450; 550; 750; 950; 1050 — испытательное напряжение грозовых импульсов (полный импульс), кВ; УХЛ,Т — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69; 1 — категория размещения по ГОСТ 15150-69.

На более высокие классы напряжения изоляторы последовательно собираются в колонки, как это показано на рис. 21.12.

Опорные изоляторы являются стойкими к термоударам и выдерживают трехкратный цикл резких изменений температуры. При этом для изоляторов категории размещения 1 значения перепада температур для класса напряжения до 35 кВ включительно с диаметром по телу изолятора не более 130 мм составляют (70 ±2) °С, для изоляторов класса напряжения 110 кВ и выше с диаметром по телу изолятора не более 130 мм – (60 ±2) °С, для изоляторов с диаметром по телу от 130 до 180 мм – (50 ±2) °С, для изоляторов диаметром по телу более 180 мм — (35 ±2) °С.

Изоляторы категорий размещения 2 и 3 выдерживают перепад температур: (70 ± 2) °С — изоляторы с механической прочностью на изгиб ниже 20 кН; (60 ±2) °С — изоляторы с механической прочностью на изгиб 20 кН и выше.

ПРОХОДНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Проходные изоляторы для внутренней установки климатических исполнений У, ХЛ, Т, категорий размещения 2 и 3 по ГОСТ 15150-69 предназначены для изоляции и крепления токоведущих частей в электрических аппаратах и распределительных устройствах электрических станций и подстанций.

Такие конструкции (рис. 21.13 и 21.14) выпускает промышленность со следующими нормативными характеристиками:

Номинальное напряжение, кВ . . . 6, 10, 20, 24, 35

Таблица 21.7. Технические характеристики серийно выпускаемых опорных изоляторов для наружной установки

Тип изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная механическая разрушающая сила на изгиб, даН	Испытательное напряжение грозовых импульсов (полный импульс), кВ	Длина пути утечки внешней изоляции, см, не менее	Высота изолятора H, мм	Номинальный диаметр изоляционной части D, мм
ИОС10-300, Т1	10	300	80	20	302	150
ИОС10-300 УХЛ1					295	
ИОС10-500 УХЛ, Т1		500		20	190	140
ИОС10-2000 УХЛ, Т1		2000				
ИОС20-500 УХЛ, Т1	20	500	125	40	284	185
ИОС20-500 УХЛ, Т1					315	150
ИОС20-2000 УХЛ, Т1		2000				
ИОС35-500 УХЛ, Т1	35	500	195	70	355	200
ИОС35-500 УХЛ, Т1					440	175
ИОС35-500 УХЛ, Т1						
ИОС35-2000 УХЛ, Т1		2000			570	214
ИОС110-300 УХЛ, Т1	110	300*	480	200	1000	235
ИОС110-400 УХЛ, Т1		400		190	1020	200
ИОС110-600 УХЛ, Т1		600		223	1050	220
ИОС110-1000 УХЛ, Т1		1000		190	1100	225
ИОС110-1250 УХЛ, Т1		1250				230
ИОС110-1500 УХЛ, Т1		1500				
ИОС110-1600 УХЛ, Т1		1600				245

* 300 означает минимальный разрушающий крутящий момент, даН · м.

Номинальный ток, А 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 16000, 30000;

Минимальная разрушающая сила на изгиб, даН (1 даН = 10 Н). . . . . 375, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4250.

Проходные изоляторы для наружно-внутренней установки климатических исполнений У, ХЛ, Т, категории размещения 1 наружного конца и категории размещения 2 внутреннего конца по ГОСТ 15150-69 служат для соединения токоведущих частей закрытых распределительных устройств электрических станций и подстанций, комплектных распределительных устройств, трансформаторных подстанций с открытыми распределительными устройствами или линиями электропередачи.

Нормированные характеристики изоляторов для наружно-внутренней установки (рис. 21.15 — 21.18) следующие:

Номинальное напряжение, кВ 10, 20, 3

Номинальный ток, А 400, 630, 1000, 1600, 2000, 3150, 5000, 6300, 8000, 10 000

Минимальная разрушающая сила на изгиб, даН 750, 1250, 2000 4250

В зависимости от токовой нагрузки изолятора в его внутренней полости расположены одна, две или три токоведущие шины. Центрирование токоведущих шин осуществляется посредством конических шайб, которые к тому же предохраняют внутреннюю полость от попадания в нее влаги и загрязнений (см. рис. 21.13, 21.15, 21.16, 21.18).

Токоведущие шины изоляторов исполнений У и ХЛ изготовляют из алюминия или алюминиевых сплавов по ГОСТ 5.2253-74 и ГОСТ 15176-76. Для изоляторов исполнения Т токоведущие шины изготовляют из меди или медных сплавов по ГОСТ 434-71 и защищают гальваническим покрытием или горячим лужением.

В изоляторах на напряжение 20 и 35 кВ на внутреннюю поверхность изоляционного тела и поверхность, предназначенную для крепления фланца, наносится проводящее или полупроводящее покрытие, которое имеет электрический кон-

Таблица 21.8. **Технические характеристики новых модификаций опорных изоляторов для наружной установки**

Тип изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Минимальная механическая разрушающая сила на изгиб, кН	Испытательное напряжение грозовых импульсов (полный импульс), кВ	Длина пути утечки внешней изоляции, см, не менее	Номинальная высота изолятора H, мм	Максимальный диаметр изоляционной части, мм
С4-80 I УХЛ, Т1	10	4	80	20	210	180
С6-80 I УХЛ, Т1		6			215	
С20-80 I УХЛ, Т1		20		25	285	190
С4-125 I УХЛ, Т1	20	4	125	40	305	
С6-125 I УХЛ, Т1		6			315	195
С20-125 I УХЛ, Т1		20			355	230
С4-200 I УХЛ, Т1	35	4	200	70	475	210
С6-200 УХЛ, Т1		6			475	
С20-200 IУХЛ,Т1		20			560	245
С6-250 I УХЛ, Т1		6	250	105	560	215
С4-550 I УХЛ, Т1	110	4	550	217	1220	300
С4-550 II УХЛ, Т1				330		
С6-550 I УХЛ, Т1		6		217		
С6-550 II УХЛ, Т1				330		
С8-550 I УХЛ, Т1		8		217		
С12,5-550 I УХЛ, Т1		12,5		217		350
С12,5-550 II УХЛ, Т1				330		
С16-550 I УХЛ, Т1		16		217		
С16-550 II УХЛ, Т1				330		
С20-550 I УХЛ, Т1		20		217		
С20-550 II УХЛ, Т1				290		
С4-750 I УХЛ, Т1	150	4	750	350	1700	
С4-750 II УХЛ, Т1				420		
С6-750 I УХЛ, Т1		6		350		
С6-750 II УХЛ, Т1				420		
С8-750 I УХЛ, Т1		8		350		
С8-750 II УХЛ, Т1				420		
С12,5-750 I УХЛ, Т1		12,5		350		400
С12,5-750 II УХЛ, Т1				420		
С4-1050 I УХЛ, Т1	220	4	1050	400	2300	450
С4-1050 II УХЛ, Т1				570		
С6-1050 I УХЛ, Т1		6		400		
С6-1050 II УХЛ, Т1				570		
С8-1050 I УХЛ, Т1		8		400		
С8-1050 II УХЛ, Т1				570		
С12,5-1050 I УХЛ, Т1		12,5		400		
С12,5-1050 II УХЛ, Т1				570		

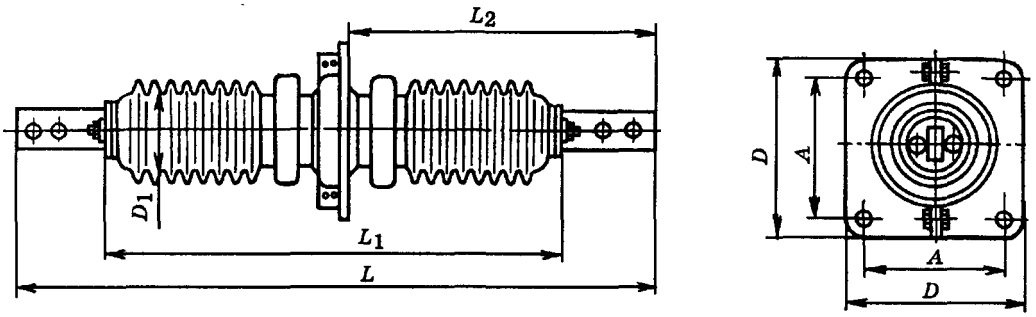


Рис. 21.13. Проходной изолятор внутренней установки с одной токоведущей шиной

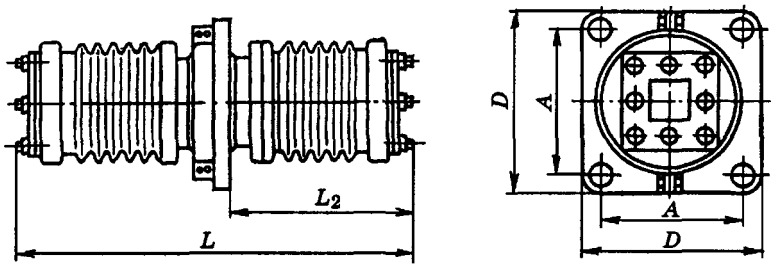


Рис. 21.14. Проходной изолятор внутренней установки, выпускаемый без токоведущих шин

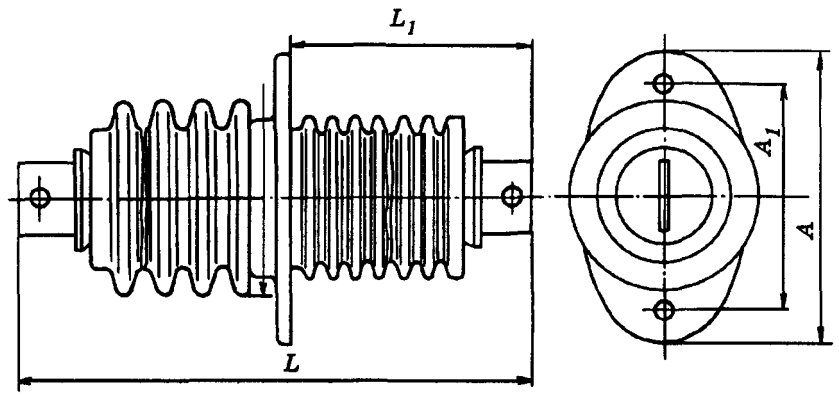


Рис. 21.15. Проходной изолятор для наружно-внутренней установки категории А

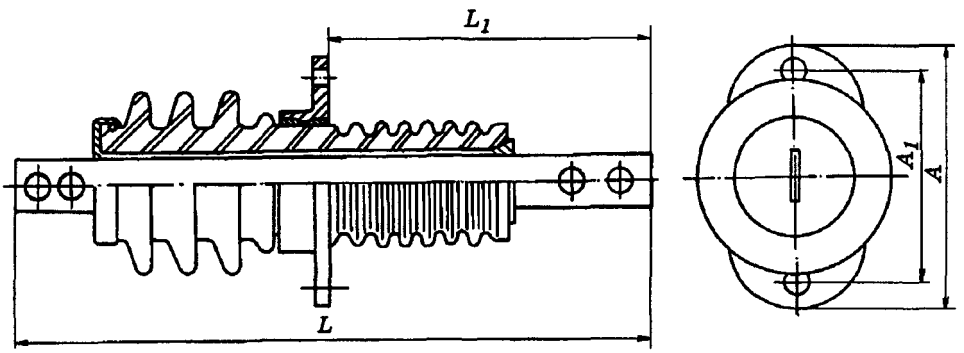


Рис. 21.16. Проходной изолятор для наружно-внутренней установки категории Б

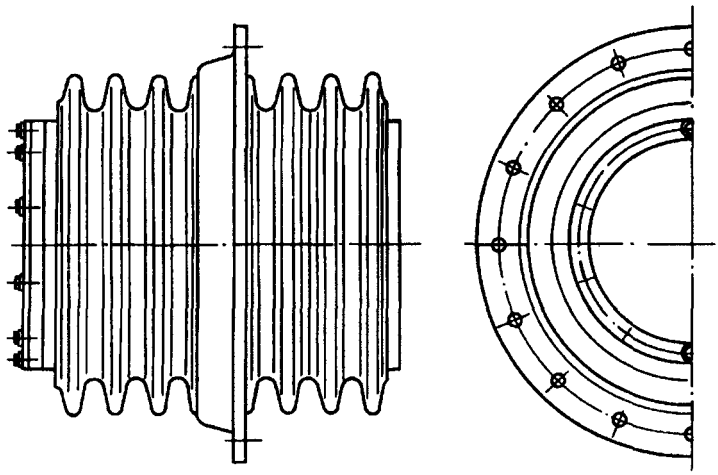


Рис. 21.17. Проходной изолятор для наружно-внутренней установки, поставляемый без токоведущих шин

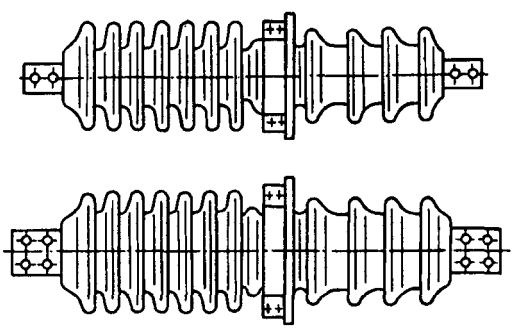


Рис. 21.18. Проходные изоляторы для работы в КРУ

такт с соответствующими металлическими частями изолятора.

Проходные изоляторы на номинальные токи 2000 А и выше с минимальной разрушающей силой на изгиб 2000 даН и более поставляют потребителям без токоведущих шин (см. рис. 21.14 и 21.17).

На рис. 21.15 показана конструкция проходного изолятора наружно-внутренней установки с нормальной изоляцией (категория А), а на рис. 21.16 — с усиленной изоляцией (категория Б). На рис. 21.18 приведены конструкции и расположение фланцев для изоляторов комплектных распределительных устройств (КРУ).

Проходные изоляторы являются стойкими к резким изменениям температуры и выдерживают без снижения механических и электрических свойств трехкратный цикл медленного изменения температуры от − 60 до + 50 °С для изоляторов исполнений У и Т и пятикратный цикл от − 65 до + 40 °С для изоляторов исполнения ХЛ.

Проходные изоляторы выдерживают в течение 1 с без повреждения воздействие тока короткого замыкания, амплитуда которого в 25 раз превышает значение номинального тока, при этом температура токоведущих частей не превышает: 200 °С — для алюминия и его сплавов; 300 °С — для меди.

Срок службы проходных изоляторов не менее 25 лет. Интенсивность отказов не более $4 \cdot 10^{-7}$ 1/ч для изоляторов первой категории качества и не более $2 \cdot 10^{-7}$ 1/ч для изоляторов высшей категорнн качества.

В табл. 21.9 приведены технические характеристики проходных изоляторов для работы в помещении.

В условном обозначении изоляторов буквы и цифры обозначают: И — изолятор; П — проходной; цифра в числителе — номинальное напряжение, кВ; цифра в знаменателе — номинальный ток, А; следующая цифра — минимальная разрушающая сила на изгиб, даН; далее — климатическое исполнение и категория размещения.

В табл. 21.10 приведены технические характеристики проходных изоляторов для наружно-внутренних установок с токовводами.

ЛИНЕЙНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Линейные изоляторы служат для изоляции и крепления проводов и грозозащитных тросов на воздушных линиях электропередачи и на распределительных станциях и подстанциях высокого напряжения частотой 50—60 Гц.

По конструктивному исполнению линейные изоляторы подразделяются на штыревые, подвесные тарельчатого типа и стержневые [21.7; 21.8].

Штыревые изоляторы (рис. 21.19) нашли широкое распространение на линиях электропередачи 10 и 20 кВ. Для увеличения длины пути утечки конструкция имеет развитую боковую поверхность.

Изоляционная деталь изготовляется из электротехнического фарфора или стекла.

Срок службы изоляторов 30 лет. Вероятность безотказной работы изоляторов $P(t)$ определяется по формуле

$$P(t) = 1 - \lambda t,$$

где $\lambda = 0{,}001$ год$^{-1}$ — среднегодовой уровень отказов; t — период с момента выпуска изолятора заводом, годы.

Таблица 21.9. Технические характеристики проходных изоляторов для работы в помещении

Тип изолятора	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Минимальная разрушающая сила на изгиб, даН	Размеры, мм					Количество шин	Масса, кг
				L	L_1	L_2	D	A		
ИП-6/400-375 УХЛ, Т2	6	400	375	360	270	187	165	140	1	4,0
ИП-10/1000-750 УХЛ, Т2	10	1000	750	520	335	255	190	150	2	7,07
ИП-20/1000-2000 УХЛ, 2	20	1000	2000	740	530	329	322	266	1	49,0
ИП-10/5000-4250 У2	10	5000	4250	640	—	315	555	495	**	75,0
ИП-20/6300-2000 УХЛ2	20	6300	2000	740	—	315	750	710	**	106,0
ИП-20/10000 У, Т2	20	10 000	*	462	—	314	625	563	**	48,0
ИП-20/16000 У, Т2	20	16 000	*	480	—	220	1030	990	**	112,0
ИП-24/30000-3000 УХЛ, Т2	24	30 000	3000	545	—	423	250	200	**	239,0
ИП-35/400-750 УХЛ, Т2	35	400	750	910	805	423	250	200	1	30,2
ИП-35/630-750 УХЛ, Т2	35	630	750	910	805	423	250	200	1	31,3
ИП-35/1000-750 УХЛ, Т2	35	1000	750	1010	800	473	260	200	2	34,0
ИП-35/1600-750 УХЛ, Т2	35	1600	750	1010	800	473	260	200	2	34,5

* — Не нормируется.
** — Поставляется без шин.

Технические характеристики штыревых изоляторов приведены в табл. 21.11.

В условном обозначении изолятора буквы и цифры означают: Ш — штыревой, Ф или С — соответственно из фарфора или стекла, цифра — номинальное напряжение, кВ; последняя буква — исполнение изолятора.

Подвесные изоляторы тарельчатого типа нашли самое широкое распространение на линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Изоляционные детали таких изоляторов изготовляют из электротехнического фарфора или закаленного стекла. Вследствие шарнирного соединения в гирлянды, изоляторы подвергаются растягивающим усилиям. Нормированными значениями минимальных разрушающих усилий на растяжение являются 40, 70, 120, 160, 210, 300 и 400 кН (ГОСТ 6490-83). В зависимости от районов эксплуатации подвесные изоляторы выпускают в различном исполнении, отличающемся длиной пути утечки.

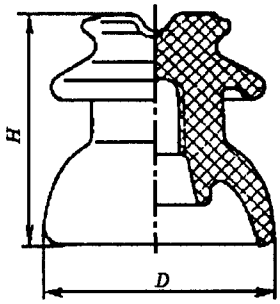


Рис. 21.19. Линейный штыревой фарфоровый изолятор на напряжение до 10 кВ типа ШФ10Г

Для каждого класса изоляторов нормированными значениями являются уровень радиопомех и уровень коронного разряда.

В условном обозначении изоляторов с нормальной изоляцией (категория А) буквы и цифры означают: П — подвесной изолятор тарельчатого типа; Ф — фарфоровый; С — стеклянный; 40, 70, 120, 160, 210, 300, 400 — минимальная разрушающая сила на растяжение, кН; А, Б, В, Г, Д, Е — конструкторские модификации изолятора равной механической прочности, отличающиеся геометрическими размерами (Н и Д).

На рис. 21.20 показаиа конструкция подвесного изолятора с нормальной изоляцией (А). Для районов с загрязненной атмосферой в коиструкциях изоляторов значительно увеличена длина пути утечки.

В конструкциях изоляторов грязестойкого исполнения в условное обозначеиие вводится третья буква, характеризующая конструкцию изолятора.

Например:

изолятор ПСВ70Е — подвесиой, стекляииый, с вытянутыми (В) ребрами (рис. 21.21);

изолятор ПСД70Е — двукрылый (Д) изолятор (рис. 21.22);

изолятор ПСС70Е — изолятор со сферической (С) формой (рис. 21.23);

изолятор ПСК70Е — изолятор с конической (К) формой (рис. 21.24);

изолятор ПСА70Е — антивандальный (А) изолятор (рис. 21.25).

Таблица 21.10. Технические характеристики проходных изоляторов для наружно-внутренних установок

Тип изолятора	Длина пути утечки, категория по ГОСТ 9920-75	Номинальное напряжение/импульсное напряжение	Номинальный ток, А	Минимальная разрушающая сила на изгиб, кН	L, мм	L_1, мм	A, мм	A_1 Ном. мм	Количество шин	Масса, кг, не более
ИП - 10/630 - 7,5 УХЛ1	А	10/80	630	7,5	565	340	180	140	1	7,5
ИП - 10/630 - 7,5, Т1									1	9
ИПУ - 10/630 - 7,5 УХЛ1	Б				620				1	10
ИПУ - 10/630 - 7,5, Т1									1	11
ИПУ - 10/630 - 7,5 I УХЛ1					580	290	215	175	1	7
ИП - 10/630 - 12,5 УХЛ1	А			12,5	585	335	205	155	1	8
ИП - 10/630 - 12,5, Т1									1	11
ИПУ - 10/630 - 12,5 УХЛ1	Б				620				1	13
ИП - 10/1000 - 7,5 УХЛ1	А		1000	7,5	565	340	180	140	1	14
ИП - 10/1000 - 7,5, Т1									2	8
ИП - 10/1000 - 7,5 ТУХЛ1	Б				620				2	11
ИПУ - 10/1000 - 7,5, Т1									2	12
ИП - 10/1000 - 12,5 УХЛ1	А			12,5	565	335	205	155	2	11
ИП - 10/1000 - 12,5, Т1									2	13
ИПУ - 10/1000 - 12,5 УХЛ1	Б				620				2	14,8
ИПУ - 10/1000 - 12,5, Т1									2	16
ИП - 10/1600 - 12,5 УХЛ1	А		1600			370	240	195	2	16,2
ИП - 10/1600 - 12,5, Т1									2	22
ИПУ - 10/1600 - 12,5 УХЛ1	Б				665				2	17
ИПУ - 10/1600 - 12,5, Т1									2	23
ИП - 10/2000 - 12,5 УХЛ1	А		2000		640	380			2	16,6
ИП-10/2000-12,5, Т1									2	21
ИПУ-10/2000-12,5 УХЛ1	Б				685				2	18
ИПУ-10/2000-12,5, Т1									2	25
ИП-10/3150-12,5 УХЛ1	А		3150		640				3	19
ИП-10/3150-12,5, Т1										38
ИПУ-10/3150-12,5 УХЛ1	Б				705	380	240	195	3	20
ИПУ-10/3150-12,5, Т1										34
ИП-20/2000-12,5 УХЛ1	А	20/125	2000		886	468	270	220	2	35
ИП-20/2000-12,5, Т1					915	483			2	45
ИП-20/3150-12,5 УХЛ1	А		3150		886	468			3	38
ИП-20/3150-12,5, Т1					915	483			3	49
ИП-35/400-7,5 УХЛ1	А	35/195	400	7,5	1056	507	240	200	1	26
ИП-35/400-7,5, Т1					1020	476			1	38
ИПУ-35/400-7,5 УХЛ1	Б				1056	521			1	28
ИПУ-35/400-7,5, Т1					1050	486			1	32
ИП-35/630-7,5 УХЛ1	А		630		1056	507			1	27
ИП-35/630-7,5, Т1					1040	496			1	38
ИПУ-35/630-7,5 УХЛ1	Б				1056	521			1	29
ИПУ-35/630-7,5, Т1					1090	506			1	34
ИП-35/1000-7,5 УХЛ1	А		1000		1056	521			2	35
ИП-35/1000-7,5, Т1					1080	511			2	47
ИПУ-35/1000-7,5 УХЛ1	Б				1056	521			2	37
ИПУ-35/1000-7,5, Т1					1090	506			2	47
ИП-35/1600-7,5 УХЛ1	А		1600		1056	521			2	36
ИП-35/1600-7,5, Т1					1080	511			2	47,9

Таблица 21.11. Технические характеристики линейных изоляторов и изоляторов для электрифицированных железных дорог

Параметр	Изолятор																	
	Стеклянный линейный подвесной тарельчатый												Фарфоровый подвесной тарельчатый			Стеклянный фиксаторный	Штыревой стеклянный и фарфоровый		
	Тип																		
	ПС40	ПС70Е	ПС120В	ПС160Д	ПСС210Б	ПС210В	ПСК300А	ПС300В	ПС 400В	ПСД 70Е	ПСВ 120Б	ПСД 160А	ПФ70Д	ПФ40А	ПФ70А	ФС70-27,5/1,2	ШС 10Д	ШФ 10Г	ШФ 20Г
Диаметр тарелки D, мм	175	255	255	280	410	380	450	320	390	270	290	350	255	255	255	270	160	140	175
Строительная высота H, мм	110	127	146	146	156	170	180	195	285	127	146	146	127	214	180	455	145	140	184
Механическая (электромеханическая) разрушающая сила изолятора, кН	40	70	120	160	210	210	300	300	400	70	120	160	146	Ратяжение 40, сжатие 20	Изгиб 2, растяжение 70	Растяжение 70, изгиб 4	Изгиб 13	Изгиб 12,5	Изгиб 13
Механическая разрушающая сила остатка, кН	32	56	96	120	160	160	240	240	320	56	96	120	70	—	—	45	—	—	—
Термостойкость, перепад температуры, °С	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	45	70	70
Длина пути утечки, мм	185	383	320	370	410	370	460	385	475	411	442	440	303	303	303	1200	280	265	400

Окончание табл 21 11

Диаметр стержня d, мм	11	16	16	20	20	20	24	24	30	16	16	20	16	16	16	—	—	—	—
Масса, кг	1,7	3,4	3,9	6,8	9,8	7,3	12,4	18,8	15,8	4,4	5,6	7,7	4,5	4,7	4,7	15,8	1,9	1,7	3,5
Напряжение, кВ, не менее.																			
а) пробивное в изоляционной среде 10—50 Ом · м	100	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	Непробиваемый	160	160	180
б) выдерживаемое импульсное положительной полярности	70	100	100	110	90	110	90	130	130	110	125	130	110	100	100	200	100	100	135
в) выдерживаемое импульсное отрицательной полярности	75	100	100	110	90	110	90	130	130	110	125	130	110	100	100	200	100	100	135
г) выдерживаемое частотой 50 Гц под дождем	30	40	40	45	55	45	52	50	55	45	50	50	40	40	40	100	48	42	65
д) по уровню радиопомех от коронного разряда																			
86 дБ	25	25	30	35	40	40	40	40	40	25	30	35	—	—	—	—	—	—	—
60 дБ	—	20	20	20	20	20	—	20	20	20	20	—	20	30	30	14	—	—	—

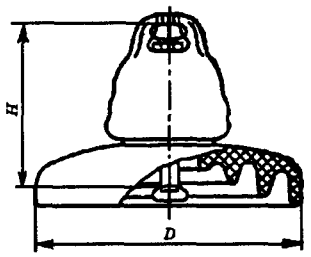


Рис. 21.20. Подвесной фарфоровый изолятор с нормальной изоляцией

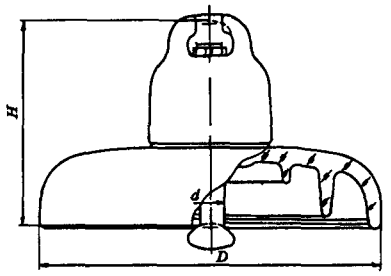


Рис. 21.21. Подвесной изолятор с вытянутыми ребрами

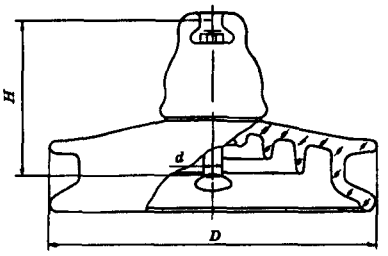


Рис. 21.22. Двукрылый подвесной изолятор

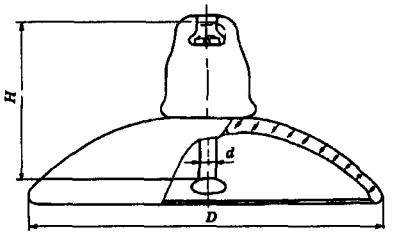


Рис. 21.23. Подвесной изолятор со сферической поверхностью

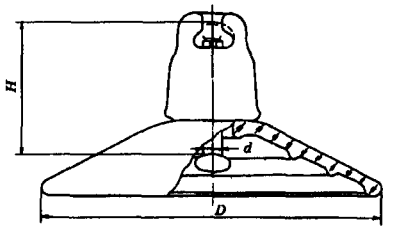


Рис. 21.24. Подвесной изолятор с конической поверхностью

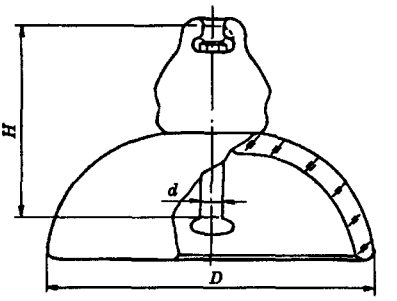


Рис. 21.25. Подвесной антивандальный изолятор

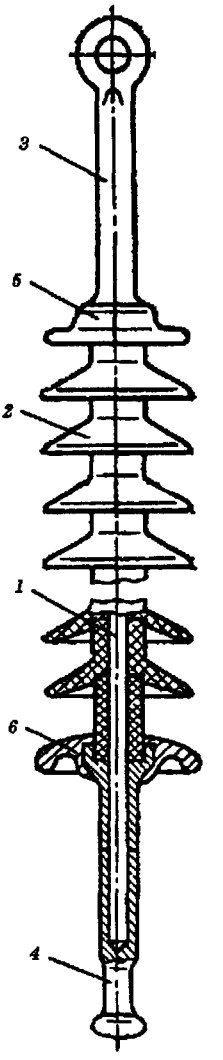


Рис. 21.26. Стержневой полимерный изолятор на напряжение 110—330 кВ

Технические характеристики подвесных изоляторов тарельчатого типа приведены в табл. 21.11.

Срок службы изоляторов составляет 30 лет. Гарантийный срок службы равен 3—4 годам. Вероятность безотказной работы в гарантийный срок

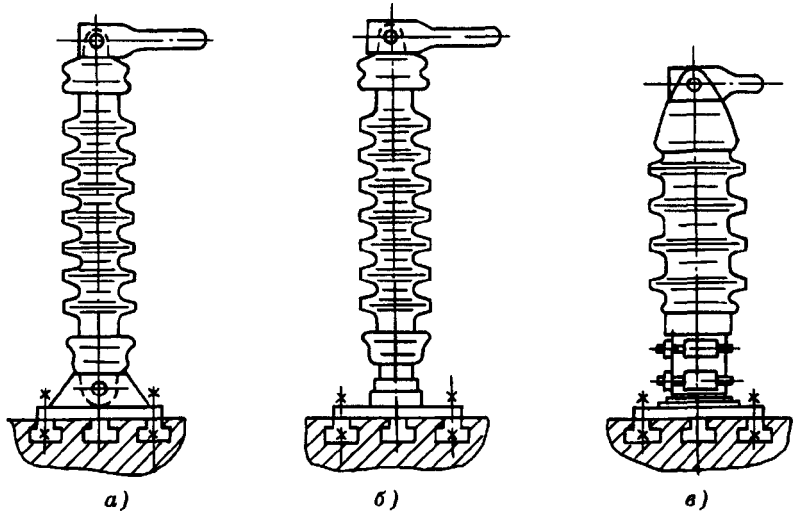


Рис. 21.27. Изолятор стержневого типа для электрифицированных железных дорог
а — секционный; *б* — фиксаторный; *в* — консольный

эксплуатации равна 0,997, после гарантийного срока 0,994 для фарфоровых изоляторов и 0,992 — для стеклянных. В послегарантийный срок эксплуатации коэффициент, характеризующий годовую повреждаемость изоляторов, равен 0,0028 1/год для фарфоровых и 0,0024 1/год для стеклянных изоляторов.

Стержневые стеклопластиковые изоляторы.

На рис 21 26 показана одна из конструкций стержневого полимерного изолятора на напряжение 110—330 кВ. Несущий механическую нагрузку стержень из анизотропного стеклопластика *1* защищен от внешних воздействий оболочкой и ребрами из атмосферостойкой кремнийорганической резины *2* Опрессованные на стержне оконцеватели *3* и *4* служат для монтажа изолятора на линии Для выравнивания электрического поля вдоль изолятора используются металлические экраны *5* и *6*.

Преимущества стеклопластиковых изоляторов видны из следующих примеров. Масса гирлянды изоляторов механической прочностью 70 кН на номинальное напряжение 110 кВ составляет около 25 кг, а эквивалентного стеклопластикового изолятора — всего 3,8 кг. На линии напряжением 330 кВ гирлянда изоляторов механической прочностью 300 кН имеет массу 180 кг, а эквивалентный стеклопластиковый — 17 кг.

Однако широкое внедрение стеклопластиковых изоляторов в практику энергетического строительства в настоящее время сдерживается ограниченной производственной базой и высокой стоимостью профильных стеклопластиков.

ИЗОЛЯТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Изоляторы служат для изоляции и крепления контактной сети переменного напряжения 27,5 кВ частотой до 100 Гц и 3,3—6,6 кВ постоянного напряжения электрифицированных железных дорог, работают в диапазоне температур от + 50 до −60 ° С

Климатическое исполнение изоляторов У, ХЛ, категория размещения 1.

По назначению изоляторы подразделяются на следующие типы. фиксаторные, секционные и консольные.

Пример обозначения фиксаторного изолятора:
ФС70-27,5/1,2 — фиксаторный стеклянный;
ФФ70-27,5/0,9 — фиксаторный фарфоровый.

Цифры означают: 70 — нормированная разрушающая механическая сила при растяжении, кН; 27,5 — класс напряжения переменного тока, кВ, 0,9; 1,2 — нормированное значение длины пути утечки, м.

На рис. 21.27 показаны конструкции изоляторов секционного, фиксаторного и консольного типов. Технические характеристики изолятора ФС70-27,5/1,2 представлены в табл. 21.11.

Средний срок службы изоляторов 30 лет. Гарантийный срок службы составляет 2 года.

Вероятность безотказной работы за первый год эксплуатации не менее 0,997, в конце гарантийного срока службы — 0,994. В послегарантийный период эксплуатации коэффициент, характеризующий годовую повреждаемость равен 0,0028 1/год.

21.4. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВВОДЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 кВ И ВЫШЕ

Высоковольтные вводы герметического исполнения на номинальные напряжения 110 кВ и выше частотой от 15 до 60 Гц предназначены для трансформаторов (автотрансформаторов), реакторов, масляных выключателей и линейных вводов, а также вводов для кабельного подключения.

Номинальные токи вводов соответствуют значениям: 315, 630, 1000, 1600, 2000, 2500, 3150 и 4000 А.

Климатическое исполнение вводов У, УХЛ, Т, категория размещения 1.

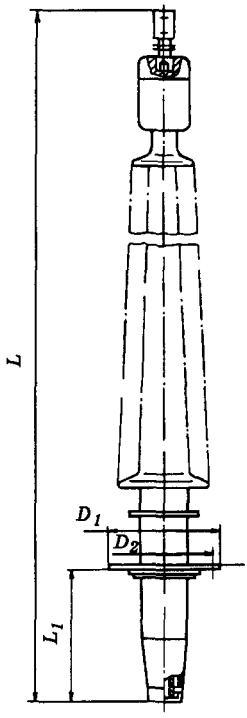
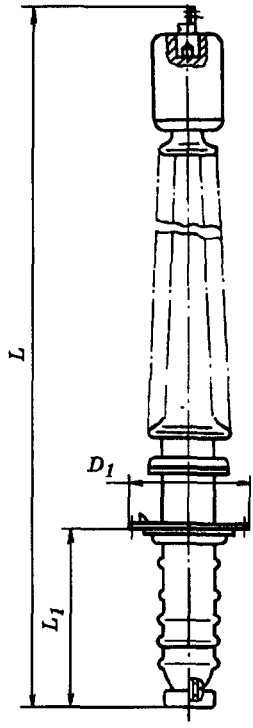


Рис. 21.28. Высоковольтный ввод с внутренней компенсацией



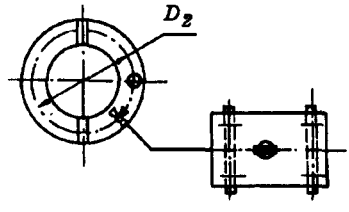


Рис. 21.29. Высоковольтный ввод с выносным баком давления

Высоковольтный ввод — это многоэлементная конструкция проходного изолятора, содержащая в себе самостоятельные элементы внутренней и внешней изоляции. В качестве внешней изоляции используются верхняя и нижняя фарфоровые покрышки. Верхняя покрышка выполняется с нормальной (категория А) и усиленной (категория Б) изоляцией. Между покрышками расположена соединительная втулка, посредством которой ввод крепится к корпусу электрического аппарата.

На соединительной втулке имеется изолированный от нее измерительный вывод или специальный вывод у вводов с измерительным конденсатором для подключения приспособления для измерения напряжения (ПИН), а также для контроля качества изоляции.

Герметичность ввода обеспечивается применением в местах контакта различных деталей ввода прокладок из маслостойкой резины.

Связующим элементом, соединяющим детали ввода в единое целое, является токоведущая медная или латунная труба, на которой в верхней ее части помещаются специальные стягивающие пружины.

Последние к тому же компенсируют разницу в значениях температурных коэффициентов соединяемых в единое целое элементов конструкции.

На трубу наматывается внутренняя изоляция конденсаторного типа, в которой тонкие диэлектрические слои последовательно чередуются с проводящими или полупроводящими обкладками. В качестве диэлектрических слоев используется маслопропитанная бумажная изоляция или бумажная, склеенная смолой (твердая изоляция).

Свободное пространство внутри ввода заполняется жидкой изолирующей средой.

Для температурной компенсации расширения изолирующей жидкости применяют внутреннюю компенсацию сильфонного типа, располагающуюся внутри верхнего экрана ввода (рис. 21.28), либо выносной бак давления (рис. 21.29).

Вводы выдерживают ток термической стойкости продолжительностью 2 с, превышающий в 25 раз значение номинального тока, и ток динамической стойкости, амплитуда которого в 62,5 раза выше номинального тока.

Кажущийся заряд частичных разрядов в изоляции ввода не превышает 10^{-11} Кл в конструкциях с маслопропитанной изоляцией и $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ Кл у вводов с твердой изоляцией.

Условное обозначение вводов: ГМТПА-45-330/1000 У1, ГОСТ 10693-81, что означает: Г —

Таблица 21.12. Технические характеристики герметичных маслонаполненных вводов

Тип ввода	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Размеры, мм				Вид температурной компенсации	Масса, кг	
			L	L_1	D_1	D_2		ввода	бака
ГМТА-45-110/630 УХЛ, Т1	110	630	2390	663	350	300	Встроенный компенсатор	136	—
ГМТБ-45-110/630 УХЛ, Т1	110	630	2490	663	350	300	То же	156	—
ГМТА-90-110/2000 УХЛ, Т1	110	2000	2540	720	420	380	" "	248	—
ГМТБ-45-150/630 У, Т1	150	630	3150	848	350	310	" "	272	—
ГМТА-45-150/630 У, Т1	150	630	2950	848	350	310	" "	256	—
ГМТБ-45-150/2000 У, Т1	150	2000	3410	994	420	380	" "	477	—
ГМТА-45-150/2000 У, Т1	150	2000	3210	994	420	380	" "	420	—
ГМТБ-90-220/1000 У1	220	1000	4690	1530	670	620	Выносной бак давления	840	96
ГМТБ-90-220/630 У1	220	630	5205	1530	670	620	Встроенный компенсатор	980	—
ГМТБ-90-220/2000 У1	220	2000	5205	1530	670	620	То же	980	—
ГМТБ-45-220/2000 УХЛ, Т1	220	2000	4645	1380	600	560	" "	975	—
ГМТА-45-220/2000 УХЛ, Т1	220	2000	4345	1380	600	560	" "	853	—
ГМТПА-45-330/1000 У1	330	1000	5505	2160	818	770	Выносной бак дааления	1598	121
ГМТПБ-45-330/1000 У1	330	1000	6415	2160	818	770	То же	1818	121
ГМТПА-45-330/2000 У1	330	2000	4975	1615	600	560	" "	1249	121
ГМТПБ-45-330/2500 У1	330	2500	5265	1615	600	560	Встроенный компенсатор	1108	—
ГМТПА-30-500/1600 У1, ХЛ1, Т1	500	1600	7150	2600	1200	1130	Выносной бак дааления	2730	226
ГМТА-30-500/1600 У1, ХЛ1, Т1	500	1600	7300	2750	1200	1130	То же	2860	226
ГМТПБ-30-500/2000 У1, ХЛ1, Т1	500	2000	7150	2600	1200	1130	" "	3160	226
ГМТА-30-500/2500 У1, ХЛ1	500	2500	7150	2600	1200	1130	" "	2490	226
ГМТПА-30-750/1000 У1	750	1000	8500	2710	1200	1130	" "	3410	226
ГМВБ-15-110/2000 У1	110	2000	3025	1130	550	486	" "	244	22
ГМЛПБ-90-110/1000 У1	110	1000	3610	1805	420	360	Встроенный компенсатор	374	—
ГМЛПБ-90-110/2000 У1	110	2000	3640	1820	420	360	То же	376	—
ГМЛА-90-220/1000 У1	220	1000	5645	3135	890	840	" "	1497	—
ГМРА-0-500/315 У1	500	315	6966	2204	1200	1130	Выносной бак давления	2956	225
ГМРА-0-750/315 У1	750	315	8400	2620	1200	1130	То же	3436	225
ГМТ*каб.-45-110/630 У1	110	630	1650	670	350	300	" "	78	12
ГТТА-60-110/800 У1	110	800	2480	970	290	290	Встроенный компенсатор	100	—

* Для кабельного подключения трансформаторов.

герметичный; М — с масляной пропиткой (Т — с твердой пропиткой); Т — для трансформаторов или реакторов (В — для выключателей, Р — для специальных реакторов, Л — линейный); П — с измерительным конденсатором, предназначенным для подключения ПИН; А — с нормальной внешней изоляцией (Б — с усиленной); 45 — допустимый угол наклона к вертикали, град; 330 — класс напряжения, кВ; 1000 — номинальный ток, А; У1 — исполнение и категория размещения.

Срок службы вводов не менее 25 лет. Вероятность безотказной работы в течение 5 лет равна 0,999.

Основные техническне характеристики вводов приведены в табл. 21.12.

21.5. РАСЧЕТЫ ИЗОЛЯТОРОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При проектировании изоляторов выполняют механические, электрические и тепловые расчеты с целью выбора оптимальной конструкции, удовлетворяющей всему набору требований. Для сложных изоляционных конструкций, какими являются изоляторы для высших классов напряжения, расчеты проводят для большего числа узлов и деталей, выполняющих как основные, так и вспомогательные функции в конструкции. При этом пользуются расчетными методиками и нормами, разработанными с учетом особенностей конструкции и технологии изготовления изолятора данного типа. В связи с большим разнообразием изоляционных конструкций, используемых в установках и аппаратах классов от 3 до 750 кВ, существует и много частных расчетных методик, основу которых составляют общие методы расчета электрических полей, механических напряженностей, стационарных и нестационарных процессов теплопередачи.

РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ

Методики механических расчетов опорных, проходных и линейных подвесных изоляторов изложены в [21.1, 21.3 и 21.6].

Для опорных и проходных изоляторов расчет обычно ведут по условию механической прочности на изгиб: $M_{изг} < \sigma_и W$, где $M_{изг}$ — расчетный изгибающий момент, действующий на изолятор, Н · м; $\sigma_и$ — разрушающее механическое напряжение на изгиб для материала изолятора, Па; W — момент сопротивления в опасном сечении изолятора, м^3.

Для изолятора в виде сплошного цилиндра

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \approx 0{,}1\, D^3;$$

для изолятора в виде полого цилиндра

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D};$$

где D и d — наружный и внутренний диаметры тела изолятора в опасном сечении.

При расчете фарфоровых изоляторов необходимо учитывать зависимость разрушающего напряжения $\sigma_и$ на изгиб от площади поперечного сечения фарфорового тела изолятора. Значения $\sigma_и$, МПа, можно определить по формулам: для неармированного фарфора $\sigma_и = 2{,}43\, S^{-0{,}38}$; для армированного фарфора с цементной заделкой $\sigma_и = 1{,}07\, S^{-0{,}42}$, где S — площадь поперечного сечения фарфорового тела изолятора в опасном сечении, м^2.

Цель расчета — определение необходимых по условиям механической прочности изолятора размеров D и d в опасном сечении.

РАСЧЕТ ОПОРНОГО ИЗОЛЯТОРА

Задаются: номинальное напряженне $U_{ном}$, расчетное механическое усилие F на изолятор и условия работы (внутренней или наружной установки, категория исполнения).

Выбирается конструктивная схема изолятора.

Расчет ведется в такой последовательности:

1. Расчетные выдерживаемые напряжения внешней изоляции в сухом состоянии принимаются на 10—20% выше соответствующих испытательных напряжений частотой 50 Гц и импульсного (см. табл. 21.1).

2. Определяется активная изоляционная высота $l_{акт}$ изолятора, равная полной его высоте за вычетом аксиальных размеров металлической арматуры. Значения $l_{акт}$ определяют по принятым значениям выдерживаемых напряжений в сухом состоянии и разрядным характеристикам воздушных промежутков вдоль поверхности изолятора (§ 21.2).

3. На изоляционном теле изолятора внутренней установки предусматривают ребра (рис. 21.30): одно для напряжений 6—10 кВ в верхней части, два-три для напряжения 15—20 кВ и три-пять для напряжения 35 кВ.

У изоляторов наружной установки ребра выполняют по рис. 21.31. Число ребер ориентировочно $n = 1{,}5 + 0{,}06 U_{ном}$, где $U_{ном}$ — номинальное напряжение, кВ. Вылет ребра A принимается равным половине промежутка между ребрами.

4. Для изоляторов наружной установки по результатам предыдущих расчетов строят очертания поверхности изоляционного тела и определяют длину l_c пути перекрытия в сухом состоянии и длину L пути утечки по поверхности. По l_c и данным, приведенным в § 21.2, проверяют способность изолятора выдержать испытательное напряжение под дождем. По L определяют удельную длину пути утечки λ, которая сравнивается с нормами (см. табл. 21.2—21.4). В случае необходимости увеличиваются активная высота $l_{акт}$ или размеры ребер.

5. По условиям механической прочности определяется диаметр тела изолятора. Расчетное условие

$$k_{зап} F h \le \sigma_и W/3,$$

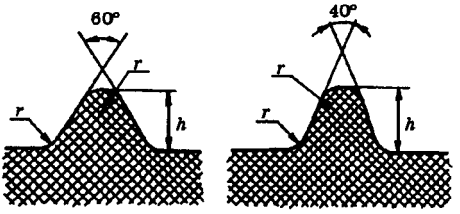


Рис. 21.30. Формы и размеры ребер для изоляторов внутренней установки:
а — $h < 20$ мм; $r = 6$ мм; *б* — $h > 20$ мм; $r = 10 \div 14$ мм

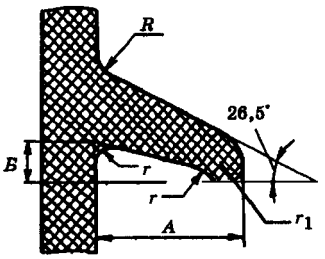


Рис. 21.31. Формы и размеры ребер для изоляторов наружной установки
$A = 30 \div 75$ мм; $Б = (0,75 \div 0.85)A$; $r = 5 \div 8$ мм; $r_1 = 10 \div 15$ мм; $R = 15 \div 24$ мм

где h — высота изолятора, принимается равной $l_{акт}$; F — расчетное механическое усилне, принимается в 2—3 раза больше рабочей нагрузки изолятора; $\sigma_и$ и W — см. расчет механической прочности изолятора; $k_{зап} = 1,05 \div 1,20$ — коэффициент запаса.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВВОДА С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Конструкция трансформаторного ввода с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) схематически показана на рис. 21.32. Нижняя часть ввода располагается в масле внутри бака трансформатора, поэтому она примерно в 2 раза короче верхней части ввода, находящейся в воздухе. Изоляционный остов такого ввода изготовляется путем намотки на центральный стержень слоев кабельной бумаги. После намотки проводится сушка остова под вакуумом, затем сборка всего ввода, заполнение его внутреннего объема дегазированным трансформаторным маслом и пропитка этим маслом бумажного остова.

В остове ввода выполняется система дополнительных электродов — обкладок из алюминиевой фольги толщиной 0,014— 0,020 мм, с помощью которых осуществляется регулирование электрнческого поля во вводе. Взаимное расположение обкладок в остове показано на рис. 21.33.

Во вводах с БМИ используются разлнчные системы обкладок. Наиболее простой и получившей широкое применение является равноемкостная система обкладок с постоянной аксиальной составляющей напряженности электрического поля. При этой системе размеры обкладок выбнраются таким

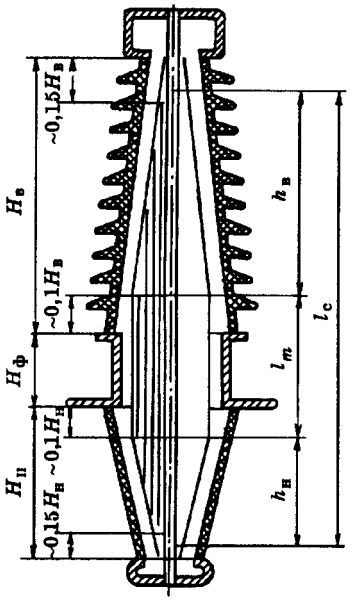


Рис. 21.32. Схема конструкции ввода с БМИ

образом, что длины уступов $\lambda_в$ и $\lambda_н$ (см. рис. 21.33) постоянны, т. е. не зависят от номера обкладки, а емкости между всеми парами соседних обкладок одинаковы. Вследствие равенства емкостей напряжения на всех слоях изоляционного остова одинаковы и равны $U_{слоя} = U/m$, где U — напряжение, приложенное ко всему вводу; m — число дополнительных обкладок в остове.

Методики электрических расчетов вводов с БМИ приведены в [21.1; 21.3 и 21.6].

Для равноемкостной системы обкладок с постоянной аксиальной составляющей напряженности соотношение между длиной l_i н радиусом r_i для i-й обкладки определяется выражением:

$$\frac{l_c^2 - l_i^2}{l_c^2 - l_m^2} = \frac{\ln r_i / r_c}{\ln r_m / r_c}, \qquad (1)$$

где l_c и r_c — расчетная длина и наружный радиус стержня; l_m и r_m — длина и радиус последней, m-й обкладкн, соединяемой с заземленным фланцем (см. рис. 21.32).

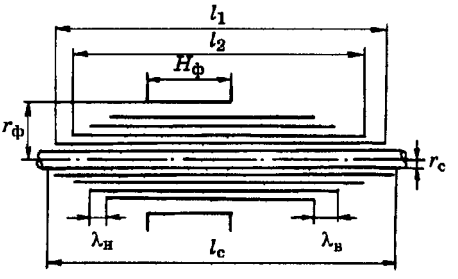


Рис. 21.33. Расчетная схема внутренней изоляции ввода с БМИ

Для рассматриваемой системы обкладок средние значения аксиальных составляющих напряженности на поверхностях конусных участков остова получаются постоянными:

на верхней конусной части

$$E_{a\,в} = \frac{U_{расч}}{m\,\lambda_в} = \frac{U_{расч}}{h_в}; \qquad (2)$$

на нижней конусной части

$$E_{a\,н} = \frac{U_{расч}}{m\,\lambda_н} = \frac{U_{расч}}{h_н}. \qquad (3)$$

Наилучшее выравнивание поля в остове в радиальном направлении при рассматриваемой системе обкладок имеет место при условии $l_c/l_m = r_m/r_c = \xi$, где ξ — константа. При этом радиальная напряженность поля в остове имеет наибольшне значения в первом н m-м (последнем) слоях:

$$E_{r\,нб} = \frac{U_{расч}\,(\xi + 1)}{2\,r_m \ln \xi} = \frac{U_{расч}\,(\xi + 1)}{2\,r_c\,\xi \ln \xi}. \qquad (4)$$

Из (4) следует, что минимум $E_{r\,нб}$ достигается при $\xi = 3{,}6$. В этом случае

$$E_{r\,нб} = 1{,}8\,\frac{U_{расч}}{r_m} = 0{,}5\,\frac{U_{расч}}{r_c}.$$

Установлено, что остов имеет минимальный объем при $\xi = 4{,}1$.

Цель электрического расчета ввода — определение геометрических размеров фарфоровых покрышек и изоляционного остова, количества и размеров обкладок в остове, при которых обеспечивается необходимая электрическая прочность внешней и внутренней изоляции ввода.

Задаются: номинальное напряженне и номинальный ток ввода.

Расчет проводится в такой последовательности:

1. Определение аксиальных размеров. Высота верхней фарфоровой покрышки $H_в$ (см. рис. 21.32) определяется нз условия отсутствня перекрытня в воздухе по поверхностн покрышки при расчетном напряженни:

$$H_в \geq U_{расч}/E_{выд.в}.$$

В качестве расчетного напряжения $U_{расч}$ принимается испытательное напряжение U_c промышленной частоты для внешней нзоляции в сухом состоянии (см. табл. 21.1). Выдерживаемая напряженность $E_{выд.в} = 0{,}30 \div 0{,}33$ МВ/м (наибольшие значения используют при расчетах вводов 110 кВ, наименьшие — при расчетах вводов высших классов напряжения).

Размер $h_н$ (см. рис. 21.32) определяется по условию отсутствия перекрытия в масле по поверхности нижнего конуса изоляционного остова прн расчетном напряженин:

$$h_н \geq U_{расч}/E_{выд.н}.$$

Здесь расчетное напряжение $U_{расч}$ прннимается равным одноминутному испытательному напряжению промышленной частоты для внутренней изоляцнн ввода (см. табл. 21.1). Выдерживаемая напряженность в масле вдоль поверхности остова:

$$E_{выд.н} = 0{,}80 \div 0{,}60 \text{ МВ/м}.$$

Остальные аксиальные размеры (см. рис. 21.32) определяются по выражениям:

$$h_в = 0{,}75\,H_в;$$

$$H_н = h_н/0{,}75;$$

$$l_m = (h_в + h_н)/(\xi - 1);\ l_c = \xi\,l_m.$$

Количество и размеры ребер по рис. 21.31 на поверхности верхней покрышки определяются так же, как и при расчете опорного изолятора.

2. Определение радиальных размеров, количества и размеров обкладок (см. рис. 21.33). Наружный радиус r_c стержня (или трубы) выбирается по условию механической прочности и допустимой плотностн рабочего тока или нз условия отсутствия в слое с наибольшей радиальной напряженностью $E_{r\,нб}$ начальных и критических частичных разрядов соответственно при наибольшем рабочем и одноминутном нспытательном напряжениях. В последнем случае с учетом (4)

$$r_c \geq \frac{U_{расч.}(\xi + 1)}{2\,\xi\,E_{доп} \ln \xi},$$

где в качестве расчетного напряжения $U_{расч}$ для вводов на напряжение до 220 кВ включнтельно принимается одноминутное испытательное напряжение частоты 50 Гц для внутренней изоляцин (см. табл. 21.1), а для вводов на напряжение 330 кВ и выше — наибольшее рабочее (фазное). Соответственно для вводов на напряжение до 220 кВ включительно допустимая испытательная напряженность $E_{доп}$ определяется выражением

$$E_{исп.доп} = 12{,}0\,\Delta_{нм}^{-0{,}58},$$

а для вводов на напряжение 330 кВ н выше

$$E_{раб.доп} = 4{,}0\,\Delta_{нм}^{-0{,}58},$$

где $\Delta_{нм}$ — наименьшая толщина слоя изоляции между обкладками, мм; принимается равной 2—4 мм.

Радиус последней, т. е. m-й обкладки $r_m = \xi\,r_c$.

Число обкладок в изоляционном слое определяется из условия $m \geq U_{расч}/\Delta_{нм}\,E_{доп}$, где значения расчетного напряження и допустимой напряженностн выбнраются так же, как и при расчете радиуса r_c стержня.

Радиусы остальных обкладок с учетом (1) и постоянства длин уступов $\lambda_в$ и $\lambda_н$ подсчитываются по выраженню:

$$r_i = r_c\,\xi^{\alpha_i},$$

где $\alpha_i = \dfrac{(2 - i/m)\,\xi + i/m}{\xi + 1}\,(i/m)$.

Здесь i — номер обкладки ($i = 0$ соответствует центральному стержню). Полученные значения r_i следует округлить до значений, кратных 0,25 мм

(толщина одного слоя бумаги, намотанной вполнахлеста).

Длины обкладок определяются по формуле

$$l_i = l_c \left(1 - \frac{\xi - 1}{\xi} \frac{i}{m}\right).$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

21.1. **Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С.** Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987.

21.2. **Александров Г.Н., Иванов В.Л.** Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

21.3. **Справочник** по электрическим аппаратам высокого напряжения / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М. Бортник и др.; Под ред. В. В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат. 1987.

21.4. **Инструкция** по проектированию изоляции в районах с чистой и загрязненной атмосферой. М.: СПО Союзтехэнерго, 1984.

21.5. **Разевиг Д.В., Соколова М.В.** Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков. М.: Энергия, 1977.

21.6. **Синявский В.Н.** Расчет и конструирование электрокерамических конструкций. М.: Энергия, 1977.

21.7. **Электрические** изоляторы / Н.С. Костюков, Н.В. Минаков, В.А. Князев и др.; Под ред. Н.С. Костюкова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

21.8. **Цимберов А.И., Штерн А.В,** Стеклянные изоляторы. М.: Энергия, 1973.

Раздел 22

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

СОДЕРЖАНИЕ

22.1. Общие положения 75
22.2. Аналоговые интегральные микросхемы 77
Операционные усилители (77). Компараторы (78). Аналоговые перемножители (79). Коммутаторы аналоговых сигналов (79). Стабилизаторы напряжения (80).
22.3. Цифровые интегральные микросхемы 80
Общие положения (80). Основные характеристики и параметры логических элементов (81). Типовые элементы малой и средней степеней интеграции (83). Микросхемы памяти (90). Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи (ЦАП и АЦП) (92). Однокристалльные микроконтроллеры (94). Специализированные БИС (96).
Список литературы 97

22.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Номенклатура интегральных микросхем (ИС) весьма обширна; они классифицируются по различным признакам. В рамках справочника представляет интерес разделение ИС по виду сигналов (аналоговые, цифровые); по уровню питающих напряжений, потребляемой мощности и требованиям к стабильности источников питания; по степени интеграции (числу логических вентилей в одной микросхеме); быстродействию, нагрузочной способности и предполагаемой области применения. Полная справочная информация по ИС насчитывает большое число наименований и большой объем данных. Поэтому авторы раздела поставили перед собой следующие задачи:

дать классификацию ИС в основном по функциональным признакам;

для начинающего пользователя дать представление о принципе действия и возможностях использования основных классов ИС;

предоставить краткую справочную информацию о наиболее существенных параметрах употребительных схем и указать литературные источники, в которых можно получить более полную информацию.

В табл. 22.1 приведены группы ИС по функциональному значению и их обозначение. По основным классам схем, применяемых в электронных устройствах промышленного назначения, приводятся краткие справочные данные и ссылка на доступные источники. Следует отметить, что бурное развитие интегральной схемотехники привело к появлению схем специального назначения, таких как схемы управления ключевыми источниками питания, схемы управления корректорами мощности, схемы управления маломощными шаговыми электроприводами и электроприводами постоянного тока и т.д. Появились целые новые классы ИС: мультимедийные ИС, ИС разной степени интеграции, включая 32-разрядные микроконтроллеры для коммуникационных задач, сигнальные процессоры. Новые классы ИС отличают глубокая специализация, большая функциональная сложность и разнообразие. В рамках данного раздела невозможно дать даже краткое представление о принципах работы всех новых классов ИС. Поэтому авторы раздела поставили перед собой задачу дать необходимый объем начальных сведений в области интегральной микросхемотехники, который позволил бы перейти к более подробным специальным источникам.

Таблица 22.1

Подгруппа и вид ИС по функциональному значению	Обозначение	Подгруппа и вид ИС по функциональному значению	Обозначение
Усилители:		схемы управления импульсными стабилизаторами напряжения	ЕУ
высокой частоты	УВ	системы источников вторичного питания	ЕС
промежуточной частоты	УР	прочие	ЕП
низкой частоты	УН	Преобразователи сигналов:	
широкополосные (в том числе видеоусилители)	УК	частоты (в том числе перемножители аналоговых сигналов)	ПС
импульсных сигналов	УИ	длительности	ПД
повторители	УЕ	напряжения (тока)	ПН
считывания и воспроизведения	УЛ	мощности	ПМ
индикации	УМ	уровня (согласователи)	ПУ
постоянного тока	УТ	аналого-цифровые	ПА
операционные	УД	цифровналоговые	ПВ
дифференциальные	УС	код-код	ПР
прочие	УП	синтезаторы частот	ПЛ
Схемы источников вторичного питания:		делители частоты аналоговые	ПК
выпрямители	ЕВ	умножители частоты аналоговые	ПЕ
преобразователи	ЕМ	прочие	ПП
стабилизаторы напряжения непрерывные	ЕН	Наборы элементов:	
стабилизаторы напряжения импульсные	ЕК	диодов	НД
стабилизаторы тока	ЕТ		

Окончание табл. 22.1

Подгруппа и вид ИС по функциональному значению	Обозначение
транзисторов	НТ
резисторов	НР
конденсаторов	НЕ
комбинированные	НК
функциональные (в том числе матрицы резисторов типа 2*R*-*R*)	НФ
прочие	НП
Схемы сравнения:	
амплитудные (сравнение уровней сигналов)	СА
временные	СВ
частотные	СС
компараторы напряжения	СК
прочие	СП
Коммутаторы и ключи:	
тока	КТ
напряжения	КН
прочие	КП
Логические элементы:	
И	ЛИ
НЕ	ЛН
ИЛИ	ЛЛ
И-НЕ	ЛА
ИЛИ-НЕ	ЛЕ
И-ИЛИ	ЛС
И-НЕ/ИЛИ-НЕ	ЛБ
И-ИЛИ-НЕ	ЛР
И-ИЛИ-НЕ/И-ИЛИ	ЛК
ИЛИ-НЕ/ИЛИ	ЛМ
расширители	ЛД
прочие	ЛП
Схемы цифровых устройств:	
регистры	ИР
сумматоры	ИМ
полусумматоры	ИЛ
счетчики	ИЕ
шифраторы	ИВ
дешифраторы	ИД
комбинированные	ИК
арифметическо-логические устройства	ИА
прочие	ИП
Триггеры:	
универсальные (типа JK)	ТВ
с раздельным запуском (типа RS)	ТР
с задержкой (типа D)	ТМ
счетные (типа T)	ТТ
динамические	ТД
Шмитта	ТЛ
комбинированные (типов DT, RST и т.п.)	ТК
прочие	ТП
Схемы запоминающих устройств:	
матрицы оперативных запоминающих устройств	РМ
матрицы постоянных запоминающих устройств	РВ
оперативные запоминающие устройства	РУ
постоянные запоминающие устройства с возможностью однократного программирования	РТ
постоянные запоминающие устройства (масочные)	РЕ
запоминающие устройства на ЦМД	РЦ
постоянные запоминающие устройства с возможностью многократного электрического программирования	РР
постоянные запоминающие устройства с ультрафиолетовым стиранием и электрической перезаписью информации	РФ
ассоциативные запоминающие устройства	РА
прочие	РП

Подгруппа и вид ИС по функциональному значению	Обозначение
Схемы вычислительных средств:	
однокристалльные микроконтроллеры	ВЕ
микропроцессоры	ВМ
микропроцессорные секции	ВС
схемы микропрограммного управления	ВУ
функциональные расширители (в том числе расширители разрядности данных)	ВР
схемы синхронизации	ВБ
схемы управления прерыванием	ВН
схемы управления вводом-выводом (схемы интерфейса)	ВВ
схемы управления памятью	ВТ
функциональные преобразователи информации (арифметические, тригонометрические, логарифмические, быстрого преобразования Фурье и др.)	ВФ
схемы сопряжения с магистралью	ВА
времязадающие схемы	ВИ
микрокалькуляторы	ВХ
контроллеры	ВГ
комбинированные схемы	ВК
прочие	ВП
Генераторы:	
гармонических сигналов	ГС
прямоугольных сигналов (автоколебательные мультивибраторы, блокинг-генераторы и др.)	ГТ
линейно-изменяющихся сигналов	ГЛ
сигналов специальной формы	ГФ
шума	ГМ
прочие	ГП
Детекторы:	
амплитудные	ДА
импульсные	ДИ
частотные	ДС
фазовые	ДФ
прочие	ДП
Многофункциональные схемы (схемы, выполняющие одновременно несколько функций):	
аналоговые	ХА
цифровые	ХЛ
комбинированные	ХК
прочие	ХП
Модуляторы:	
амплитудные	МА
частотные	МС
фазовые	МФ
импульсные	МИ
прочие	МП
Формирователи:	
импульсов прямоугольной формы (одновибраторы, блокинг-генераторы и др.)	АГ
импульсов специальной формы	АФ
адресных токов	АА
разрядных токов	АР
прочие	АП
Фильтры:	
верхних частот	ФВ
нижних частот	ФН
полосовые	ФЕ
режекторные	ФР
прочие	ФП
Схемы задержки:	
пассивные	БМ
активные	БР
прочие	БП
Фоточувствительные схемы с зарядовой связью:	
матричные	ЦМ
линейные	ЦЛ
прочие	ЦП

22.2. АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционные усилители (ОУ) составляют сравнительно большую долю выпускаемых аналоговых ИС. Каждый ОУ содержит два-три балансных симметричных каскада усиления аналоговых сигналов, подаваемых на два входа усилителя.

ОУ служит основой для построения схем, выполняющих различные функции. Первоначально ОУ были разработаны для выполнения линейных операций: усиления сигнала, алгебраического суммирования нескольких сигналов, преобразования сопротивлений, интегрирования и дифференцирования. Однако они оказались удобными и для выполнения таких функций, в которых используются нелинейные свойства: ограничение сигнала, сравнение уровней двух сигналов, замыкание и размыкание цепей, связанных с выходом ОУ. На основе нелинейных свойств ОУ выполняются компараторы, формирователи импульсов, импульсные генераторы, генераторы гармонического, линейно изменяющегося напряжения.

Всякий ОУ (в дальнейшем будем иметь в виду интегральные ОУ) представляет собой конструктивный элемент, имеющий следующие выводы: положительный и отрицательный выводы питания U_{cc1} и U_{cc2}, два входных вывода и один выходной (рис. 22.1). У некоторых ОУ имеются и другие выводы, выполняющие вспомогательные функции (входы смещения нуля и входы коррекции сопротивления). На рис. 22.1 представлена типовая схема включения ОУ в режиме усиления сигнала. Резисторы R_1, R_2, $R_{o.c}$ и $R_к$ являются внешними по отношению к ИС ОУ.

Коэффициент усиления напряжения K — отношение приращений выходного и входного напряжений. Входное напряжение измеряется между двумя входами либо между одним входом и общим выводом при неизменном потенциале второго входа. Один из входов ОУ — инвертирующий, он изменяет фазу входного сигнала на противоположную, второй — неинвертирующий (прямой):

$$K_и = -U_{вых}/U_{вх.и}; \quad K_н = U_{вых}/U_{вх.н}.$$

Усилители выполняют симметричными, т.е.

$$|K_и| = K_н = K.$$

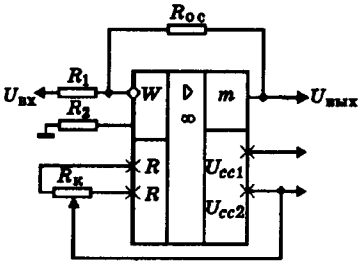


Рис. 22.1

Типичные значения K находятся в пределах $10^3 \div 10^5$.

Входное сопротивление $R_{вх} = U_{вх}/I_{вх}$ измеряется для одного из входов при неизменном потенциале другого. Оно характеризует, в какой мере входная цепь усилителя нагружает источник входного сигнала. Идеальным следует считать такой усилитель, который имеет $R_{вх} = \infty$; на практике $R_{вх} = 10^3 \div 10^6$ Ом, для прецизионных усилителей до 10^{10} Ом.

Входное сопротивление для синфазного сигнала $R_{сф} = \Delta U_{сф}/\Delta I_{сф}$ — отношение приращения напряжения на обоих соединенных между собой входах к приращению среднего входного тока, $R_{сф} >> R_{вх}$.

Так как

$$U_{вых} = U_{вх.н}K_н + U_{вх.и}K_и = K(U_{вх.и} - U_{вх.н}),$$

то одинаковые по фазе (синфазные) сигналы на обоих входах практически не влияют на выходное напряжение:

$$U_{вых} = U_{вх.сф}(K_н + K_и) = U_{вх.сф}K_{п.сф}.$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала — отношение коэффициента усиления к коэффициенту передачи синфазного сигнала $K_{п.сф}$ составляет $10^3 \div 10^5$.

Выходное сопротивление показывает, насколько выходная цепь ОУ отличается от источника ЭДС. У идеального усилителя $R_{вых} = 0$, на практике это сопротивление составляет $10^2 \div 10^3$ Ом, но всегда $R_{вых} << R_{вх}$.

Выходное напряжение ОУ не может быть выше, чем положительное напряжение питания, и ниже, чем отрицательное. На практике $|U_{вых}| \le (0{,}5 \div 0{,}8)\,|U_{cc1,2}|$, где U_{cc} — напряжение источника питания.

Из-за несовершенства усилителя его выходное напряжение может отличаться от нуля, когда $U_{вх} = 0$. Для приведения к нулю напряжения выхода на вход должно быть подано напряжение смещения нуля $U_{см}$. Это напряжение и его температурный дрейф указаны в паспорте. Основные данные наиболее распространенных ОУ приведены в табл. 22.2 [22.1—22.3].

Частотная характеристика ОУ горизонтальна, начиная с нулевой частоты. На высоких частотах усиление уменьшается с наклоном 20 дБ/декаду, достигая единицы на частоте среза f_1.

Включение ОУ для выполнения функций усиления сигнала требует присоединения не только источников питания, входного и выходного выводов, но и элементов обратной связи $R_1 = R_2$, $R_{o.c}$, а также элементов коррекции $R_к$ (см. рис. 22.1). Коэффициент усиления ОУ в схеме с обратной связью не зависит от коэффициента усиления разомкнутого ОУ и определяется внешними элементами: $K_{o.c} = R_{o.c}/R_1$. Входное и выходное сопротивления:

$$R_{вх.o.c} = R_1; \quad R_{вых.o.c} = R_{вых}K_{o.c}/K.$$

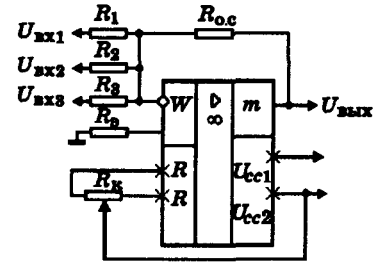
На основе ОУ можно построить схему аналогового сумматора напряжений со взвешенными ко-

Таблица 22.2

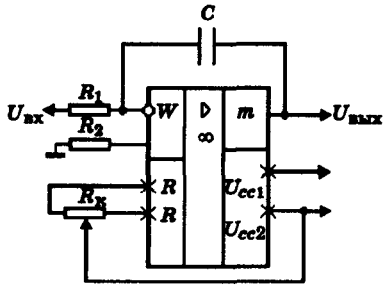
Тип микросхемы	$K \cdot 10^3$	$U_{см}$, мВ	$I_{вх}$, нА	f_1, МГц	$U_{вых}$, В	$I_{вых}$, мА ($R_н$, кОм)	U_{cc}, В
КР140УД1	2	7	$8 \cdot 10^3$	5	6	3	±12,6
КР140УД5	1	5	10^4	14	6,5	3	±12,6
КР140УД6	70	5	30	1	11	25	±15
КР140УД7	50	4	200	0,8	11,5	20	±15
КР140УД708	50	4	200	0,8	11,5	20	±15
КР140УД8	50	20	0,2	1	10	20	±15
КР140УД9	35	5	100	—	10	22	±12,6
КР140УД14	50	2	2	0,3	13	20	±15
КР140УД18	50	10	1	—	11,5	(2)	±15
К140УД22	25	10	0,2	5	11	—	±15
КР544УД1	50	15	0,15	1	10	20	±15
К553УД1	25	5	200	—	10	(2)	±15
К553УД2	20	7,5	$1,5 \cdot 10^3$	1	10	(2)	±15
К1409УД1	20	15	2	—	13	(1,8)	±15
К140УД13	0,01	50	0,2	—	1,0	—	±15
К140УД17А	200	75	3,8	—	10	—	±15
140УД21	10^3	60	0,5	—	10,5	—	±15
140УД24	10^3	5	0,01	—	4,7	—	±5
140УД26А	10^3	25	35	—	12	—	±15
140УД26Б	10^3	60	50	—	12	—	±15
140УД26В	700	100	75	—	11,5	—	±15
140УД27А	10^3	25	35	—	12	—	±15
140УД27Б	10^3	60	50	—	12	—	±15
140УД27В	700	100	75	—	11,5	—	±15
КМ551УД1А	500	$1,5 \cdot 10^3$	20	—	10	—	±15
К157УД1	500	5	500	0,5	12	1000	±15
К1423УД1	10	5	$1 \cdot 10^{-3}$	0,044	$0,9U_{cc}$	—	±1,3

эффициентами передачи по каждому из входов (рис 22.2, *а*):

$$U_{вых} = -R_{о.с}\left(\frac{U_{вх1}}{R_1} + \frac{U_{вх2}}{R_2} + \frac{U_{вх3}}{R_3}\right);$$



а)



б)

Рис. 22.2

$R_э$ рассчитывают из условия равенства проводимостей:

$$Y_э = 1/R_э = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_{о.с}.$$

На рис. 22.2, *б* представлена схема интегратора на основе ОУ. В пределах линейных режимов ОУ

$$U_{вых} = \frac{1}{R_1 C}\int U_{вх}\, dt.$$

ОУ с использованием полевых транзисторов во входных каскадах обеспечивают входные токи не более 1нА, следовательно, они пригодны для получения больших постоянных времени интеграторов даже при сравнительно малых емкостях.

На практике полезно учитывать, что усилитель КР140УД8 может работать при напряжениях питания от ±5 до ±15 В. Усилители К1423УД1 предназначены для работы с малым энергопотреблением (от ±0,9 В до ±8 В, потребляемый ток до 1 мкА). Усилители К157УД1 имеют мощный выходной каскад. Для сложных схем с большим количеством ОУ удобны многоканальные интегральные схемы, в каждом корпусе которых размещено до четырех усилителей (К1401УД1).

КОМПАРАТОРЫ

На базе ОУ разработаны схемы, преобразующие разность уровней напряжений дифференциальных входов в один из двух фиксированных уровней. На

Таблица 22.3

Тип микросхемы	$U^1_{вых}$, В	$U^0_{вых}$, В	$I_{пот}$ ($I^-_{пот}$), мА	U_{cc}, В	$t_{пер}$, нс
K554CA1	2,5÷6	—1÷0	11,5(6,5)	+12; —6	135
K554CA2	2,4÷4	—1÷0	9 (8)	+12; —6	160
K554CA3	—	—	6 (5)	±15	200
K521CA4	2,5÷4,5	0,5÷0	18,7 (7,5)	±9; +5	26
K521CA5	2,6	0,35	5,3 (2,7)	±12; —6	30
KM597CA1	0,96÷0,78	—1,9÷—1,6	27 (22)	—5,2; +5	6,5
KM597CA2	2,5÷4,5	0,5÷0	42 (34)	—6; +5	12
KM597CA3	7÷9	0,3÷2	2,6 (1)	±15	300
K1401CA1	—	0.4	2	±15	$3\cdot10^3$
K1401CA2	—	0,4	2	±15	$3\cdot10^3$
K1121CA1	2,4	0,4	30 (15)	±15	120

Примечание. $I_{пот}$ — ток потребления микросхемы.

один из двух входов обычно подается опорный уровень сигнала (возможно, нулевой), с ним сравнивается уровень сигнала, подаваемого на второй вход. Если разность уровней превышает некоторый порог, на выходе компаратора устанавливается один экстремальный уровень выходного напряжения $U^0_{вых}$, близкий к нулю, в противном случае — другой, экстремальный, уровень выходного напряжения $U^1_{вых}$, близкий к напряжению источника питания. Благодаря большому коэффициенту усиления, пороговый уровень переключения не превышает долей милливольта.

Быстродействие компаратора определяется временем преключения $t_{пер}$ из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние.

Допустимые значения входного сигнала обычно не превышают напряжения питания. Выходные цепи компаратора выполняются так, чтобы сделать возможным их непосредственное соединение с логическими схемами. Компараторы KM597CA3 снабжены триггером — защелкой для стробирования входного сигнала и запоминания предшествующего состояния. Основные данные некоторых компараторов приведены в табл. 22.3 [22.1, 22.2].

АНАЛОГОВЫЕ ПЕРЕМНОЖИТЕЛИ

Аналоговые перемножители образуют класс схем, выполняющих функции перемножения двух напряжений, лежащих в интервале ±10,4 В. Принцип действия основан на нелинейности вольт-амперных характеристик p—n-переходов. Если сомножителями являются входные аналоговые сигналы X и Y, то $U_{вых} = 0{,}1XY$. Комбинируя связи между выводами микросхемы, удается получить операции возведения в квадрат, извлечения корня, деления.

В системах управления и регулирования приведенные схемы могут найти применение в составе узлов измерения мощности, действующего напряжения и тока. Большая группа микросхем аналоговых перемножителей используется в балансных модуляторах, фазовых детекторах, схемах удвоения и фазовой автоподстройки частоты. Схемы этой группы обычно работают в области радиочастот (до нескольких десятков мегагерц) при сравнительно небольших амплитудах сигналов. Кратко опишем их функции.

Балансный модулятор при подаче на вход X модулирующего сигнала $X_m = \sin \omega t$ и на вход Y прямоугольного сигнала несущей частоты $Y = Y_m \times \text{sign}[\sin \omega t]$ вырабатывает на выходе Z амплитудно-модулированный сигнал, содержащий частоты $\omega z = m\omega \pm \Omega$, $m = 1, 3, 5,...$ Таким образом, модулятор служит для переноса спектра модулирующего сигнала в область высоких частот, близких к несущей и ее гармоническим составляющим.

Фазовый детектор, основанный на выполнении операции умножения двух гармонических колебаний с разными фазами, позволяет получить выходное напряжение, пропорциональное косинусу фазового сдвига:

$$\cos \omega t \cos(\omega t + \varphi) = \cos \varphi/2 + \cos(2\omega t + \varphi)/2.$$

Составляющая двойной частоты должна быть отфильтрована фильтром низкой частоты. Приведеиная формула поясняет и другую возможность: схема перемножения может быть использована для удвоения частоты входного сигнала (постоянная составляющая легко отфильтровывается). Более подробно см. [22.3].

КОММУТАТОРЫ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Интегральные схемы коммутаторов аналоговых сигналов представляют собой совокупность управляемых ключевых схем, которые могут коммутировать различные источники и приемники сигналов, изменяя конфигурацию цепи.

Коммутаторы аналоговых сигналов наиболее часто используются для подключения ко входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) различных источников сигналов. Коммутатор обладает следующими качествами: малым сопротивлением открытого (насыщенного) ключа $R_{отк} = 10 \div 100$ Ом, малым током утечки разомкнутого ключа (0,1÷100 нА), малым временем изменения состояния $t_{вкл} = 3 \div 500$ нс, малой мощностью управления (в статике ток управления равен нулю). Рекомендации по схемам коммутаторов приведены в [22.1, 22.2]. Основные параметры коммутаторов приведены в табл. 22.4.

Таблица 22.4

Тип микросхемы	$U_{ком}$, В	$R_{отк}$, Ом	$t_{вкл}$, нс	$U^1_{вх}$, В	$U^0_{вх}$, В	$U_{ип}$, В
KP590KH4	±15	75	150	4÷15	0÷0,8	±15
KP590KH5	±15	70	300	4÷15	0÷0,8	±15,5
KP590KH6	±15	30	300	4÷15	0÷0,8	±15
KP590KH7	±15	30	3	4÷15	0÷0,8	±15
KP590KH8	±15	70	3	5	0÷0,8	±15
KP590KH9	±15	10	500	4÷15	0÷0,8	±15
590KH12	±15	–	—	4÷15	0÷0,8	±15
590KH13	±15	—	—	4	0÷0,8	±15

Примечание. $U_{ком}$ — коммутируемое максимально допустимое напряжение; $R_{отк}$ — сопротивление открытого (насыщенного) ключа; $U_{вх}$ — управляющие напряжения ключей.

СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Стабилизаторы напряжения служат для питания нагрузки постоянным напряжением при изменении в заданных пределах напряжения питания и тока нагрузки. Стабилизатор последовательного типа основан на том, что его выходное напряжение меньше напряжения питания; разность этих напряжений приходится на регулирующий последовательный транзистор. Изменяя ток базы этого транзистора в функции выходного напряжения, можно стабилизировать выходное напряжение с высокой точностью. Типичные значения тока нагрузки десятки миллиампер — единицы ампер. При включении дополнительного транзистора с большим допустимым коллекторным током удается поднять выходную мощность стабилизатора. Часто в микросхеме стабилизатора предусматриваются выводы для подключения датчика тока, который отключает стабилизатор, запирая регулирующий транзистор при перегрузках по току и коротких замыканиях. Основные параметры интегральных стабилизаторов напряжения приведены в табл. 22.5 [22.1].

Для повышения КПД стабилизатора, что существенно при больших токах и большой разности $U_{вх}-U_{вых}$, рекомендуется использование ключевых стабилизаторов. Принцип их действия основан на изменении относительного времени замкнутого состояния ключа в цепи, содержащей компаратор, источник эталонного напряжения и фильтр. Когда напряжение снижается ниже порогового уровня, ключ замыкается, в индуктивности фильтра нарастает ток; когда выходное напряжение превышает верхний пороговый уровень, ключ размыкается.

22.3. ЦИФРОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Логическими элементами (ЛЭ) называют ИС, сигналы на входе и выходе которых могут принимать только два значения: высокий и низкий уровень напряжения. Высокий уровень напряжения принято называть логической единицей (далее 1), а низкий уровень напряжения — логическим нулем (далее 0).

Простейшие ЛЭ имеют несколько (1÷8) информационных входов и один выход. Сигнал с выхода ЛЭ, как правило, поступает на входы сразу нескольких ЛЭ. В электронных устройствах, выполненных на основе ЛЭ, информация многократно преобразуется и разветвляется, проходя последовательно по цепочке ЛЭ. Для надежного и безошибочного функционирования такого устройства необходимо, чтобы каждый ЛЭ при различных комбина-

Таблица 22.5

Тип микросхемы	$K_{нU}$, %	$K_{нI}$, %	$\Delta U_{вх}$, В	$U_{вх}$, В	$U_{вых}$, В	$I_{нагрузки}$, мА	$I_{пот}$, мА
К142ЕН2А	0,3	0,5	3	15÷40	12÷30	50÷150	4
К142ЕН2Б	0,1	0,2					
К142ЕН3А	0,05	0,5	3	19÷45	16÷30	50÷150	10
К142ЕН3Б							
К142ЕН4А	0,05	0,5	3	19÷40	15÷30	—	10
К142ЕН4Б			4				
К142ЕН5А	0,05	3	—	—	4,9÷5,1	—	10
К142ЕН5Б					5,88÷6,12		
142ЕН10	0,05	1,0	—	—	1,2÷30	—	7,0
142ЕН11		0,33					

Примечание. $K_{нU}$, $K_{нI}$ — коэффициенты нестабильности по напряжению и току, они определяются по относительному изменению выходного напряжения (тока нагрузки); $I_{пот}$ — потребление стабилизатора.

циях нагрузок независимо от положения в цепи и длины межэлементных связей обеспечивал неискаженное логическое преобразование информацин. Важно отметить, что искажение уровней и даже частичное искажение формы выходиых сигналов при передаче иифорнации каждым из ЛЭ устройства не будет иметь существеииого зиачения и ие приведет к сбоям в работе устройства, если эти искажения находятся в пределах допустимого разброса уровией сигналов 0 и 1. Большое число разнообразных по функциональиому назначению ЛЭ в современиых цифровых устройствах исключают возможиость индивидуального согласования и регулировку отдельных ЛЭ в процессе наладки изделия. В связи с этим ЛЭ должны иметь следующие свойства:

Совместимость входных и выходных сигналов. В цифровых устройствах ЛЭ соединены так, что выход одного элемента работает непосредственно на входы других без специального согласоваиия уровней. Выполиение таких соединений возможио только в том случае, если зоны допустимых уровией иапряжений сигналов 0 и 1 для входов и выходов ЛЭ совпадают.

Работоспособность в достаточно широкой области допусков на параметры. Колебания напряжения питания и температуры окружающей среды, технологический разброс внутренних параметров элементов и процесс старения не приводят к выводу сигналов из допустимых зон 0 и 1.

Квантование при формировании выходных сигналов. На рис. 22.3 представлена типовая передаточная характеристика $U_{вых} = f(U_{вх})$ иеинвертирующего логического элемеита (неинвертирующим называют ЛЭ, у которого иизкому входному сигналу соответствует иизкий выходной, а высокому входному — высокий выходной). Точка a соответствует уровню логического 0, а точка b — логической 1. Точка k разграиичивает две области сигналов: с амплитудой $U_{вх}$ меиьше порога квантования $U_{кв}$ и с амплитудой $U_{вх}$, превышающей порог квантоваиия. Рассмотрим формирование сигнала на выходе цепочки их трех ЛЭ (рис. 22.4, *а*). Сигналы с амплитудой $U_{вх1} > U_{кв}$ на выходе цепочки усиливаются и стремятся к уровню 1, а сигналы с амплитудой $U_{вх1} < U_{кв}$ ослабляются и стремятся к уровию 0. Таким образом, при прохождении по цепочке ЛЭ сигнал приближается к одному из уровией цифрового сигнала (0 и 1), т.е. квантуется. Реальные логические элементы обладают разбросом передаточиых характеристик, что однозначио определяет зоиы

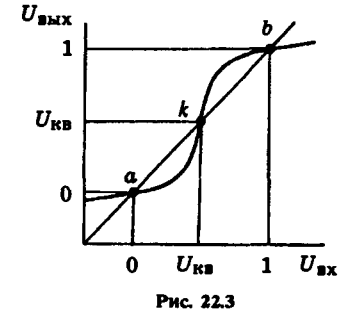
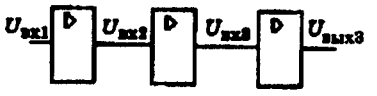
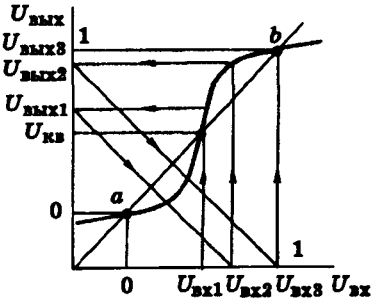


Рис. 22.3



а)



б)

Рис. 22.4

отображеиия сигналов 0 и 1 и допустимый уровень помех в логических цепях (рис. 22.4, *б*).

Помехоустойчивость. Зона помехоустойчивости ЛЭ определяется его амплитудной передаточной характеристикой как разность между порогом квантоваиия $U_{кв}$ и соответствующими уровнями сигналов 0 и 1: $U_{пом0} = |U_{кв} - U_a|$; $U_{пом1} = |U_{кв} - U_b|$. Если помеха не достигает порога кваитования, то иа выходе ЛЭ появляется сигнал помехи с меньшей амплитудой, чем на входе. Такая помеха, проходя через несколько последовательио включеиных ЛЭ, затухает и ие вызывает искажения информации в логической цепи.

Нагрузочная способность. Для построения разветвленных логических цепей иеобходимо, чтобы каждый ЛЭ обладал определенной нагрузочной способиостью по входу, т.е. мог одиовремеиио управлять иескольким входами других ЛЭ. Нагрузочную способность ЛЭ прииято выражать коэффициентом разветвлеиия по входу $K_{раз}$; ои равен максимальному количеству входов ЛЭ, которые можно подключить к выходу ЛЭ, ие вызывая искажений формы и амплитуды сигнала, выходящих за границы зои отображения 0 и 1.

Перечисленные свойства ЛЭ, реализованные в конкретных сериях ИС, позволили создать ионый класс цифровых устройств, которые в отличие от аиалоговых позволяют иа этапе проектирования и наладки практически полностью исключить из рассмотрения электрические параметры отдельных узлов и вести сиитез только на фуикциональиом уровие. Такой подход позволил значительно увеличить алгоритмическую сложность устройств управления при повышеиии надежности.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Все разиообразие цифровых ИС делится иа семейства, которые прииято иазывать сериями. Каждая серия объединяет цифровые ИС, различающи-

еся по фуикциоиальиому назначению, но обладающие одииаковыми электрическими параметрами. Это обеспечивает полное согласование элементов, т.е. возможиость иепосредственного соединения друг с другом и позволяет вести разработку электронного устройства, абстрагируясь от электрических параметров, уделяя основное виимание процессам преобразоваиия информации.

Несмотря на то что в наиболее распространеиные серии цифровых ИС входят до 100 различиых по функциоиальному иазиачению элементов, серию в целом можно охарактеризовать, используя параметры простейшего ЛЭ серии — инвертора. Инвертором называют логический элемент, который имеет одии вход и один ныход, причем низкому входному напряжению соответствует высокое выходное, а высокому входиому — низкое выходное.

Различают три группы параметров: интегральиые, статические и дииамические.

Интегральные параметры служат для сравнительной оценки качества цифровых ИС, они отражают уровеиь развития техиологии производства ИС. Осиовными интегральиыми параметрами ИС являются работа переключения E, максимальная частота переключеиия $F_{\text{mвх}}$ и степеиь интеграции N.

Работа переключеиия равна произведеиию среднего времени задержки сигналов в вентиле $t_{\text{зд.ср}}$ на среднюю мощность потребления вентиля $P_{\text{пот.ср}}$, т.е. $E = P_{\text{пот.ср}} t_{\text{зд.ср}}$. По мере совершеиствования техиологии производства ИС работа переключения непрерывио снижается, что отражает тенденцию развития интегральиой микросхемотехиики с точки зрения пользователя: снижение мощности потребления при увеличении быстродействия. Однако в рамках одной и той же технологии, т.е. при задаином уровне работы переключеиия, можно создать различиые серии ИС, обладающие либо высоким быстродействием (малое значение $t_{\text{зд.ср}}$) и большой потреблнемой мощностью, либо низким быстродействием и малой потребляемой мощиостью. Статистическими исследованиями устаиовлено, что 60% устройств, выполняемых иа цифровой элементной базе, требуют применеиия быстродействующих ИС, остальные 40% могут быть реализованы на ИС с иизким быстродействием.

Максимальная частота переключеиия $F_{\max}$ определяет минимальиый времеиной интервал между двумя соседиими переключеииями ЛЭ и отражает быстродействие коикретной серии ИС.

Степеиь интеграции отражает фуикциоиальную сложность устройства, которое можио разместить на кристалле ИС и поместить в отдельный корпус. Степень иитеграции N определяется числом транзисторов (либо числом простейших эквивалентиых ЛЭ) иа кристалле. Так, для ИС запомииающих устройств степень интеграции оценивают числом бит памяти иа кристалле. По степеии иитеграции цифровые схемы делят на четыре категории ИС: ИС малой степеии интеграции, СИС — ИС средней степеии интеграции, БИС — ИС большой степеии иитеграции, СБИС — ИС сверхбольшой степеии интеграции. По прогнозам к 2000 г. степеиь иитеграции будет достигать 10^9 транзисторов на кристалле.

Статические параметры. К статическим параметрам ЛЭ относятся:

напряжение питания U_{cc};

входные иапряжеиия логического 0 и 1 $U^0_{\text{вх}}$ и $U^1_{\text{вх}}$;

выходиые напряжения логического 0 и 1 $U^0_{\text{вых}}$ и $U^1_{\text{вых}}$;

входные токи логического 0 и 1 $I^0_{\text{вх}}$ и $I^1_{\text{вх}}$;

выходные токи логического 0 и 1 $I^0_{\text{вых}}$ и $I^1_{\text{вых}}$;

мощность потреблеиия $P_{\text{пот}}$.

ИС малой и средней степеии интеграции имеют однополярный источиик питания. Серии ИС, выполненные по технологии ТТЛ, предъявляют достаточно жесткие требоваиия к напряжению источиика питаиия: $U_{cc} = 5\text{В} \pm 10\%$, а серии ИС, выполненные по технологии КМОП допускают варьирование U_{cc} в диапазоие от 3 до 15 В. ИС, выполненные по технологии ЭСЛ, имеют отрицательное иапряжение питания. Схемотехника ЛЭ выполнена таким образом, что $U^1_{\text{вых}}$ приближается к уровню напряжения питаиия, а $U^0_{\text{вых}}$ — к напряжению общего вывода. ЛЭ, для которых $U^1_{\text{вых}} > U^0_{\text{вых}}$, называются элементами с положительиой логикой (ТТЛ, КМОП), а элементы, для которых $U^1_{\text{вых}} < U^0_{\text{вых}}$ — элементами с отрицательной логикой (ЭСЛ).

Динамические параметры. Основиыми динамическими параметрами ЛЭ являются задержка распространеиия сигнала $t_{\text{зд.р}}$ при переключении и длительность иарастающего $t^{0,1}_{\text{ф}}$ и спадающего $t^{1,0}_{\text{ф}}$ фронтов (для положительной логики). Задержка распространеиия сигнала определнется как иитервал яремеии между фроитами входного и выходного сигналов ЛЭ, измереиный по задаиию уровню.

В иастоящее время находнт применение цифровые ИС, изготовлеииые по следующим технологиям:

ТТЛ — траизисторио-траизисторная логика (и ее разновидность с диодами Шотки — ТТЛШ);

КМОП — логика иа основе комплементарных полевых траизисторов;

ЭСЛ — эмиттерио-связаниая логика;

И2Л — интегральная иижекционная логика.

До недавнего времеии наибольшим распространением пользовались серии ИС на осиове технологий ЭСЛ и ТТЛ (ТТЛШ) с нремеием задержки распространеиия 1 и 20 ис соответствеиио, что обусловливалось их достаточно высоким быстродействием ($F_{\max} = 150$ МГц), иекритичностью к условиям монтажа в лабораторных условиях иа этапе создания макетов при приемлемой мощности потреблеиия. Это обстоятельство обусловило разнообразие различных серий ИС. Цифровые ИС иа основе техиологии КМОП имели меньшую мощность потребления и большую помехозащищеииость, но время задержки одного логического элемента составляло около 100 нс. В результате серии ИС иа основе КМОП оставались в теии: имеется меньшее разиообразие серий на основе КМОП и меиьшее число элемеитов различного функциоиального назначения в каждой серии. Од-

Таблица 22.6

Серия ИС	Зарубежный аналог	U_{cc}, В	$t_{зд.р}$, нс	F_{max}, МГц	$K_{раз}$	$I^1_{вх}$, мкА	$I^0_{вх}$, мА	$I^1_{вых}$, мкА	$I^0_{вых}$, мА
155	SN74	5,0	10	35	10	40	—1,6	—400	16
158	SN74L	5,0	33	3	10	10	—0,18	—200	3,6
131	SN74H	5,0	6	50	10	50	—2	—500	20
555	SN74LS	5,0	9,5	45	20	20	—0,36	—400	8
531	SN74S	5,0	3	125	10	50	—2	—1000	20
КР1533	SN74ALS	5,0	4	50	40	10	—0,2	—400	8
КР1531	SN74F	5,0	2	130	33	20	—0,6	—1000	20

Таблица 22.7

Серия ИС	Зарубежный аналог	U_{cc}, В	$t_{зд.р}$, нс	F_{max}, МГц	$K_{раз}$	$I^1_{вх}$, мкА	$I^0_{вх}$, мА	$I^1_{вых}$, мкА	$I^0_{вых}$, мА
К176	CD4000	9	250	2	50	0,1	—0,1	—0,5	0,5
К561	MC14000A	3÷15	140	4	50	0,3	—0,3	—0,44	0,44
К1561	CD4000B	3÷18	60	8	—	0,3	—0,3	—0,44	0,44
К1564	54HC	2÷6	23	50	—	0,1	—0,1	—4,0	4,0
К1554	74ACxxx	2÷6	8	150	—	0,1	—0,1	—24	24

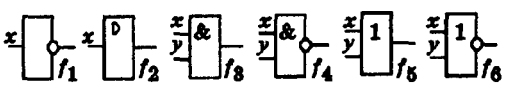
нако в 90-х годах приборы на осиове КМОП улучшили свои характеристики более чем на два порядка, практически догнав по быстродействию приборы на основе ТТЛ и ЭСЛ. В настоящее время преимущество технологии КМОП для БИС стало подавляющим, а для ИС и СИС технологии ТТЛ и КМОП сохраняют равноправие [22. 5]. В табл. 22.6 и 22.7 приведеи перечеиь серий ИС, выполиеиных по технологиям ТТЛ и КМОП и выпускаемых в России, и их зарубежиые аиалоги.

ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ СТЕПЕНЕЙ ИНТЕГРАЦИИ

По функциональиому назиачеиию ИС малой и средней степеней интеграции делятся на две группы: комбииациоиные схемы и схемы с памятью.

Комбинационными логическими схемами (КЛС) называют такие цифровые ИС, у которых значения выходиых сигналов определяются только значением входных сигналов в данный момент времени и не зависят от предыдущего состояиия выходных сигналов. КЛС не имеют внутренних обратных связей. Все КЛС по существу являются преобразователями кодов по определеиному закону. Эти законы определяются разработчиком в зависимости от задач примеиения. На практике были выделены типовые законы, им даны названия, и каждый тип КЛС реализован иа уровне ИС малой или средией степени интеграции. К типовым КЛС относятся: логические элементы, дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры и арифметическо-логические устройства [22.4—22.6].

Простейшие логические элементы. К этой группе элементов относятся ииверторы, повторители, элементы типа И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ. Каждый из элементов реализует простейшую логическую фуикцию, которую принято описывать таблицей соответствия (другое иазвание — таблица истиниости). Инверторы (рис. 22.5, *а*) реализуют логическую функцию НЕ — отрицание (ииверсия) логической



а) *б)* *в)* *г)* *д)* *е)*

Рис. 22.5

величиины: $y = \bar{x}$. Таблица истиииости функции $f_1 = \bar{x}$ приведена на рис. 22.6, *а*. Повторители (рис. 22.5,*б*) ие изменяют логический сигнал: $f_2 = x$. Оии используются для увеличеиия нагрузочиой способности сигнала x по току. Таблица истиииости фуикции И (логическое умножение, конъюнкция) может быть прочитана так: фуикция f_3 принимает значение 1 только в том случае, если все аргументы прииимают зиачения 1 (рис. 22.6, *б*). Аналитическая запись фуикции И: $f_3 = x \,\&\, y$. Графическое

x	f_1
0	1
1	0

а)

x	y	f_3	f_4
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

б)

x	y	f_5	f_6
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1

в)

Рис. 22.6

представление элемеитов И и И-НЕ (реализует функцию $f_4 = \overline{x \,\&\, y}$) даио на рис. 22.5, *в* и *г*. Элементы типа И-НЕ нашли по технологическим особенностям более широкое распространение в различных сериях ИС, чем элементы И Элементы И-НЕ выполияют с различным числом входов· 2, 3, 4, 8.

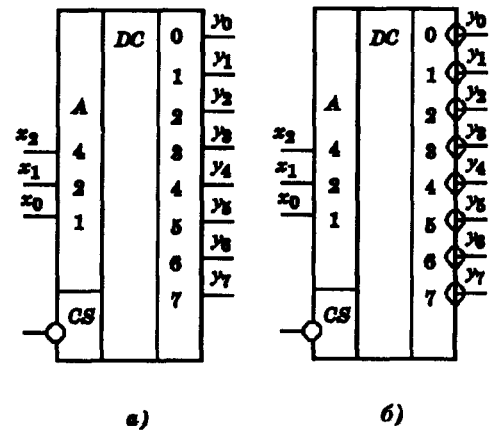
Функция ИЛИ (логическое сложение, дизъюнкция) описывается таблицей соответствия рис, 22.6, *в*: фуикция f_5 принимает значение 1, если хотя бы одии из аргументов принимает зиачение 1. Аналитическая запись фуикции ИЛИ: $f_5 = x + y = x \vee y$. Графическое представлеиие элементов ИЛИ и ИЛИ-НЕ (реализует фуикцию $f_6 = \overline{x \vee y}$) даио на рис. 22 5, *д* и *е*.

Дешифраторы. Полным дешифратором иазывается КЛС, которая имеет m входов и 2^m выходов, у которой для каждой комбинации входиых сигналов формируется единичиый (для дешифраторов с прямыми выходами) сигнал только иа одиом выходе, причем иомер выхода определяется десятичным эквивалентом входиого двоичного набора. На рис. 22.7, *а* приведен прямой дешифратор *DC* на $m = 3$ информациоиных входа и $2^m = 8$ выходов (дешифратор 3×8), на рис. 22.7, *в* — таблица истинности, описывающая его фуикциоиирование.

Кроме информационных входов современные ИС дешифраторов имеют специальные входы управлеиия (вход *CS* на рис. 22.7, *а*). Если кристалл даииого *DC* не выбраи, т.е $CS = 1$, то все выходы *DC* будут установлеиы в неактивное состояиие, т.е. в 0. При $CS = 0$ каждый из выходов *DC* реализует функцию, заданную таблицей истинности.

Наряду с рассмотренным *DC* с прямыми выходами в ТТЛ сериях ИС широко представлеиы *DC* с инверсными выходами (рис. 22.7, *б*). Такой *DC* при $CS = 0$ для каждого иабора входных сигналов x_i формирует логический 0 только на одном из выходов y_i, сигнал на выходе остальиых y_j равен 1. При $CS = 1$ все выходы y_j устанавливаются в 1. В интегральном исполиении выполняют дешифраторы следующих структур: 2×4, 3×8, 4×16. Кроме того, выпускаются неполные дешифраторы, у которых число выходов $N < 2m$, например 4×10.

Шифраторы. Шифраторы (рис. 22.8, *а*) выполняют преобразоваиие, обратное дешифратору: на вход шифратора подается 2^n-разрядный унитариый код, а на выходе образуется n-разрядный двоичный код. На рис. 22 8, *б* приведена таблица истинности шифратора, выполняющего преобразование 4-разрядного унитарного кода $X = (x_3, x_2, x_1, x_0)$ в 2-разрядный двоичный код $Y = (y_1, y_0)$. Для приведенного шифратора должно выполияться условие $x_i x_j = 0$, что трудно обеспечить, если сигналы на входы x поступают от независимых источиików. В схемах реальных шифраторов (таблица истинности рис. 22.8, *в*) каждому входу иазначен приоритет, обычно, чем больше номер входа, тем выше приоритет. Шифратор выдает на выходе двоичный код числа i, если $x_i = 1$, а иа входы с номерами $j > i$ поданы 0. В интегральном исполиении выпускаются шифраторы на четыре и восемь информациоиных входов с дополнительными входами управления.



а) *б)*

Входы			Выходы							
x_2	x_1	x_0	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

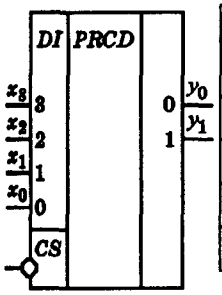
в)

Рис. 22.7

Мультиплексоры. Цифровым мультиплексором *MS* (ие путать с аналоговым коммутатором) называют КЛС, которые имеют m входов адреса, 2^m входов даииых и одии выход Z, причем значение сигиала на выходе Z равно значеиию на входе x_i, где i определяется десятичным эквивалентом двоичного кода на входах адреса y_i. На рис 22.9, *а* приведен *MS* с $m = 3$ адресными входами $y_2, \ldots, y_0$, и $2^3 = 8$ входами данных $x_0, \ldots, x_7$ (мультиплексор 3×8), а на рис. 22 9, *б* — таблица истинности его функционирования.

В иитегральном исполнеиии выпускаются *MS* следующих структур: 4×1, 8×1, 16×1 Реальиые *MS* имеют дополнительный вход *CS*, выход Z может быть как прямым, так и иивереным Для упрощения понимания *MS* может быть представлеи как коммутатор с однонаправлеиным распространеиием сигналов от y_i к Z, управление ключами которого ведется посредством дешифратора (1 — ключ замкнут, 0 — ключ разомкнут).

Демультиплексоры. Цифровым демультиплексором *DMX* иазывают КЛС, которая имеет один вход даиных E, m входов адреса x_i и 2^m выходов y_j, при-



а)

Входы				Выходы	
x_3	x_2	x_1	x_0	y_1	y_0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1

б)

Входы				Выходы	
x_3	x_2	x_1	x_0	y_1	y_0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1
0	0	1	×	0	1
0	1	×	×	1	0

× — сигнал входа не влияет на состояние выходов.

в)

Рис. 22.8

чем сигнал на входе E коммутируется на один из выходов y_j, где j определяется десятичным эквивалентом двоичного кода на входах адреса x_j. На рис. 22.10, *а* приведен *DMX* с $m = 3$ адресными входами и $2^3 = 8$ выходами данных (демультиплексор 1×8), а на рис. 22.10, *б* — таблица истинности. Демультиплексор выполняет функцию, противоположную мультиплексору. В интегральном исполнении выполняют демультиплексоры следующих структур: 1×4, 1×8, 1×16. Схемы реальных *DMX* имеют дополнительную логику на входе $E = E_1 \& E_2 \& E_3$ (где $E = E$ или $\overline{E}$), а также могут выполняться с прямыми и инверсными выходами.

При сравнении дешифраторов и демультиплексоров с одинаковым числом адресных входов можно выявить почти полную их идентичность по входам и выходам. Реально связь между этими двумя видами КЛС более глубокая на уровне уравнений алгебры логики, что позволяет создать единую структуру и путем подачи управляющих сигналов использовать одни и те же ИС или как дешифратор, или как демультиплексор.

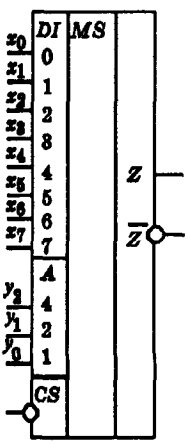
Сумматоры. Сумматором *SM* называют КЛС, которая производит вычисление суммы двух двоичных n-разрядных чисел. Ниже рассмотрен пример сложения для двух целых 6-разрядных чисел $X = (x_5, \ldots, x_0)$ и $Y = (y_5, \ldots, y_0)$:

5	4	3	2	1	0	— номер разряда
32	16	8	4	2	1	— вес разряда
0	0	1	0	0	1	$X = 9$
+						
0	1	0	0	0	1	$Y = 17$
0	1	1	0	1	0	$Z = 26$ — сумма

Сложение производится по правилу двоичной арифметики:

в каждом двоичном разряде складываются значения трех одноразрядных слагаемых x_i, y_i, c_i, где x_i и y_i — одноименные разряды двоичных чисел X и Y, а c_i — сигнал переноса i-го разряда;

значение одноразрядной суммы S_i равно 1, если нечетное число из трех перемен ных x_i, y_i, c_i равны 1;



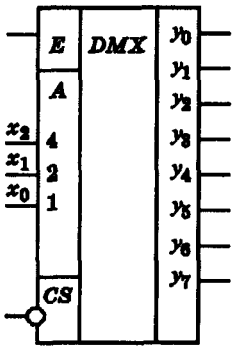
а)

Входы											Выход
y_2	y_1	y_0	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	z
0	0	0	0/1	×	×	×	×	×	×	×	$x_0 = 0/1$
0	0	1	×	0/1	×	×	×	×	×	×	$x_1 = 0/1$
0	1	0	×	×	0/1	×	×	×	×	×	$x_2 = 0/1$
0	1	1	×	×	×	0/1	×	×	×	×	$x_3 = 0/1$
1	0	0	×	×	×	×	0/1	×	×	×	$x_4 = 0/1$
1	0	1	×	×	×	×	×	0/1	×	×	$x_5 = 0/1$
1	1	0	×	×	×	×	×	×	0/1	×	$x_6 = 0/1$
1	1	1	×	×	×	×	×	×	×	0/1	$x_7 = 0/1$

Примечание. Строку 1 следует понимать: при $x_0 = 0$ $z = 0$; при $x_0 = 1$ $z = 1$; состояние остальных входов x_i значения не имеет.

б)

Рис. 22.9



а)

Входы				Выходы							
x_2	x_1	x_0	E	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
0	0	0	$E = 0/1$	$E = 0/1$	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	$E = 0/1$	0	$E = 0/1$	0	0	0	0	0	0
0	1	0	$E = 0/1$	0	0	$E = 0/1$	0	0	0	0	0
0	1	1	$E = 0/1$	0	0	0	$E = 0/1$	0	0	0	0
1	0	0	$E = 0/1$	0	0	0	0	$E = 0/1$	0	0	0
1	0	1	$E = 0/1$	0	0	0	0	0	$E = 0/1$	0	0
1	1	0	$E = 0/1$	0	0	0	0	0	0	$E = 0/1$	0
1	1	1	$E = 0/1$	0	0	0	0	0	0	0	$E = 0/1$

б)

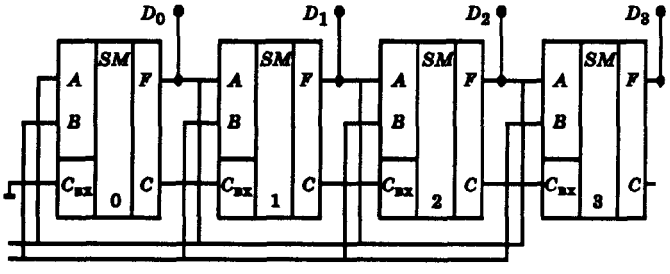
Рис. 22.10

значение переноса c_{i+1} при вычислении суммы в разряде i равно 1, если не менее двух переменных x_i, y_i, c_i равны 1.

Входы			Выходы	
A	B	$C_{вх}$	F	C
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

а)

Данное правило позволяет записать таблицу истинности для одноразрядного *SM* (рис. 22.11, *а*) На рис. 22.11, *б* показана схема 4-разрядного сумматора. В интегральном исполнении на уровне СИС выполняются схемы 1-разрядных сумматоров с дополнительной комбинационной логикой на входе, 2-разрядные сумматоры, 4-разрядные сумматоры. На основе схем сумматоров с добавлением элементов малой степени интеграции могут быть реализованы схемы вычитания и сравнения многоразрядных двоичных чисел [22.6].



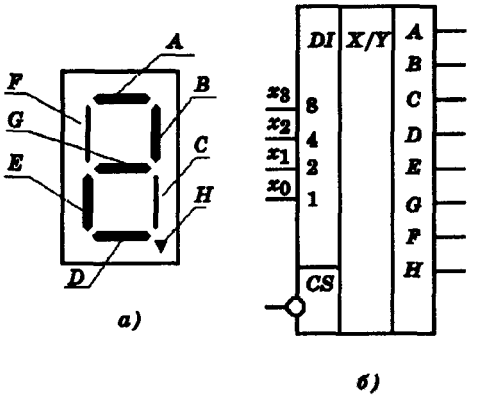
б)

Рис. 22.11

Схемы сравнения двоичных чисел. Для удобства пользователя эти схемы выделеиы в отдельный класс и реализованы полиостью в интегральном исполнении. В интегральиом исполнении на уровне СИС реализованы 4-разрядные схемы сравиения с тремя функциями выхода $F(A_n = B_n)$, $F(A_n < B_n)$, $F(A_n > B_n)$. Специальиые входы предназиачены для последовательиого соединиеиия схем сравиения с целью увеличения разрядности n [22.6].

Арифметические логические устройства (АЛУ) используются для построения арифметических узлов. В настоящее время, когда широкое распространение получили микропроцессоры и однокристальные микроконтроллеры, построеиие АЛУ на основе специальных схем СИС имеет смысл только для устройств предельиого быстродействия. В каждый момент времени АЛУ выполиеияет одну из 32 арифметических или логических операций иад двумя n-разрядными числами A_n и B_n. Среди операций есть такие, как A_n+B_n, A_n-B_n, $A_n B_n$, $A \vee B_n$, и т.д. Вид операции задается 5-разрядным кодом команды M, E_4, E_3, E_2, E_1. 4-разрядное АЛУ имеет три группы выводов: входы для задания двух 4-разрядных чисел A_4 и B_4, входы выбора операции E и M, входы для последовательиого соединеиия нескольких ИС с целью увеличения разрядности.

Преобразователи кодов. Преобразователи кодов имеют m входов и k выходов. Соотиошения между числами m и k могут быть любыми: $m = k$, $m > k$, $m < k$. Типичным представителем этой группы ИС является преобразователь двоичио-десятичиого кода в код семисегментного индикатора десятичных цифр (рис. 22.12, *а*). Для отображения на индикаторе десятичной цифры (иапример, 2) необходимо обеспечить свечение указаииых сегментов. Если электрическая схема такова, что свечению сегмента соответствует уровень 1 иа выходе преобразователя кодов, а незасвечеииому сегменту уровеиь 0, то отображение цифр обеспечит преобразователь кодов (рис. 22.12, *б*) с представленной таблицей истинности (рис. 22.12, *в*).



а) *б)*

Цифра	Входы				Выходы							
	x_3	x_2	x_1	x_0	A	B	C	D	E	F	G	H
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0

в)

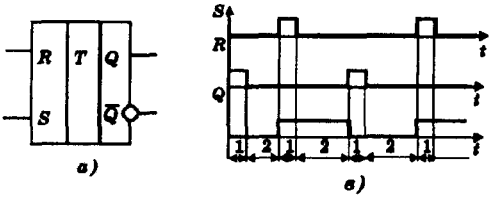
Рис. 22.12

В интегральном исполнении на уровне СИС реализованы преобразователи кодов, обладающие типовыми фуикциями: преобразователи двоично-десятичного кода в двоичиый и обратио, преобразователи двоичного кода в код Грея, знакогеиераторы для различных типов индикаторов.

Схемами с памятью, или последовательиостными автоматами, называют такие цифровые ИС, у которых значения выходных сигналов определяются не только значеиием входных сигналов в даиный момент времеии, но и значеиием выходных сигналов в предыдущий момеит. Как следует из определения, схемы с памятью имеют внутреиние обратные связи. Аналогично КЛС среди схем с памятью выделены типовые элементы и каждый тип реализован на уровне ИС малой или средией степеии интеграции. К типовым схемам с памятью относятся триггеры, регистры, счетчики [22.4—22.6].

Триггеры являются простейшими схемами с памятью. Если проводить аналогию с КЛС, то триггеры эквивалентны элементам малой степени интеграции: инверторам, элементам И-НЕ, ИЛИ-НЕ. На осиове триггеров строятся более сложные схемы с памятью. Триггер — элементарная ячейка памяти, которая может хранить 1 бит информации, т.е. триггер может запомнить предварительно устаиовлеииый в ием уровень логического сигнала 0 или 1 и сохранять этот уровень при включенном питаиии до момента иовой записи. По способу записи информации различают следующие осиовные типы триггеров: R-S-триггер; J-K-триггер; D-триггер; T-триггер.

R-S-триггер (рис. 22.13, *а*) имеет два входа — R и S и выход Q, с которого снимается информация: R (reset) — вход установки в 0, S (set) — вход установки в 1. Часть ИС имеет также инверсный выход $\overline{Q}$ для удобства проектирования схем иа основе триггеров. Функционирование R-S-триггера подчиняется следующему правилу: если на входы подана совокупность сигналов $S = 1$, $R = 0$, то триггер устанавливается в 1, при подаче $S = 0$, $R = 1$ триггер устанавливается в 0, при $S = 0$, $R = 0$ триггер сохраняет предыдущее состояние, комбииация сигналов $S = 1$, $R = 1$ запрещена. Правило иллюстрирует



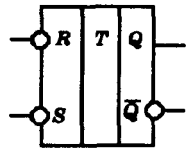
а) *в)*

Входы		Предыдущее состояние $Q(t)$	Выход
S	R		Q(t+1)
1	0	$Q(t) = 0/1$	1
0	1	$Q(t) = 0/1$	0
0	0	$Q(t) = 0/1$	$Q(t) = 0/1$
1	1	Запрещениая комбинация входных сигналов	Не определеио

$Q(t)$ — состояние триггера до подачи указанной комбинации R и S;
$Q(t+1)$ — состояние триггера после переключения

б)

Рис. 22.13



а)

Входы		Предыдущее состояние $Q(t)$	Выход
S	R		Q(t + 1)
1	0	$Q(t) = 0/1$	1
0	1	$Q(t) = 0/1$	0
0	0	$Q(t) = 0/1$	$Q(t) = 0/1$
1	1	Запрещеиная комбииация входиых сигналов	Не определеио

$Q(t)$ — состояние триггера до подачи указанной комбинации R и S;
$Q(t+1)$ — состояние триггера после переключения

б)

Рис. 22.14

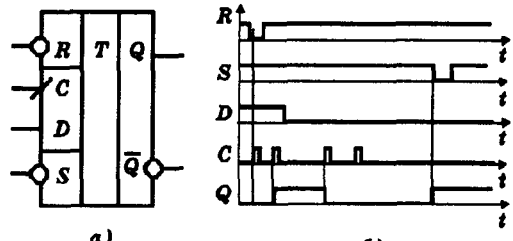
таблица переключеиия R-S-триггера с прямыми входами (рис. 22.13, *б*). Временна́я диаграмма на рис. 22.13, *в* иллюстрирует "эффект запомииания" R-S-триггера. В течение интервалов 1 состояние триггера определяется комбииацией сигналов R и S, а в течение интервалов 2 комбинация входных сигиалов всегда одинакова: $S = 0$, $R = 0$, одиако триггер находится в разных состояниях 0 и 1, которые повторяют предыдущее состояние, т.е. запоминают его. На практике используются как R-S-триггеры с прямыми входами установки, так и триггеры с инверсными R-S-входами (рис. 22.14, *а*), для которых таблица переключения приведена на рис. 22.14, *б*.

D-триггер имеет две группы входов: входы синхроиной и асинхронной устаиовки. Входы асинхронной устаиовки R и S имеют приоритет над входами синхроиной устаиовки D и C, если на одном из входов R или S активный уровень сигнала. Для D-триггера (рис. 22.15, *а*) это означает следующее: если на R-S-входах установлена одиа из двух комбинаций $S = 1$, $R = 0$ или $S = 0$, $R = 1$, т.е. реализуется режим записи 0 или 1, то триггер подчиняется логике работы по R-S-входам и ие реагирует на сигналы синхронных входов D и C. Если же на R-S-входах установлены неактивные уровии $S = 1$, $R = 1$, т.е. нет режима записи по R-S-входам, то работа триггера подчиняется правилу установки по синхрониым входам: триггер "запомииает" уровень сигнала на входе D (data) в момент положительиого перепада на входе C. Вход C приято называть стробирующим, тактовым или динамическим. Временная диаграмма (рис. 22.15, *б*) иллюстрирует режимы устаиовки D-триггера.

J-K-триггер (рис. 22.16, *а*) также имеет две группы входов: синхрониой и асинхроиной установки. Входы асинхронной установки R и S имеют приоритет над входами синхронной установки J, K, C. Логика работы по R-S-входам полиостью повторяет логику работы D-триггера. Если на входах R и S устаиовлеиы иеактивные уровии, триггер измеияет свое состояние Q в момент спада сигнала на тактовом входе C в соответствии с таблицей переключения по входам J и K (рис. 22.16, *б*).

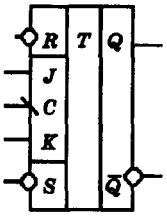
T-триггер (рис. 22.17, *а*) называют также счетным триггером, так как на его основе выполняются интегральные счетчики импульсов. Если входы R и S находятся в неактивном состояиии, то по каждому положительиому перепаду сигнала иа тактовом входе T-триггер измеияет свое состояние иа противоположиое (рис. 22.17, *б*).

Счетчики. На рис. 22.18, *а* представлена схема простейшего 3-разрядиого двоичного счетчика. Каждый из трех T-триггеров счетчика изменяет состояние на противоположное при поступлеиии на динамический вход C положительиого перепада сигнала. Выходами счетчика являются выходы триггеров. Если выходиой код сиимать с инверсиых выходов триггеров (выход $\overline{D}_2$ соответствует старше-



а) *б)*

Рис. 22.15

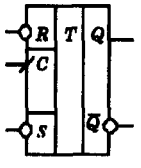


а)

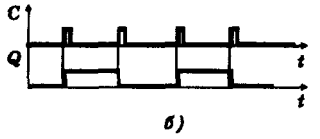
Входы		Предыдущее состояние $Q(t)$	Выход
J	K		$Q(t+1)$
1	0	$Q(t) = 0/1$	1
0	1	$Q(t) = 0/1$	0
0	0	$Q(t) = 0/1$	$Q(t+1) = Q(t) = 0/1$
1	1	$Q(t) = 0/1$	$Q(t+1) = \overline{Q(t)} = 1/0$

б)

Рис. 22.16



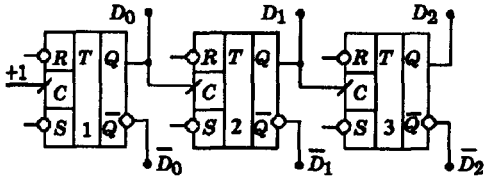
а)



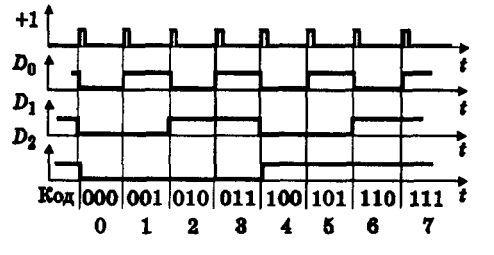
б)

Рис. 22.17

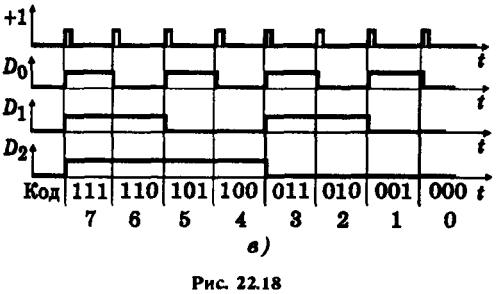
му разряду кода), то при поступлении на вход +1 последовательности импульсов код на выходе будет изменяться в следующем порядке: 0, 1, 2,...7, 0,... (рис. 22.18, *б*). Такой порядок счета называют прямым. Если в качестве выходного рассматривать код с прямых выходов триггеров, то порядок счета будет



а)



б)



в)

Рис. 22.18

обратным: 0, 7, 6, ...1, 0, ... (рис. 22.18, *в*). Число внутренних состояний счетчика называют коэффициентом счета $K_{сч}$, в данном примере $K_{сч} = 2^3 = 8$. По способу кодирования внутренних состояний различают счетчики: двоичные, двоично-десятичные, счетчики Джонсона. В зависимости от порядка счета различают счетчики: суммирующие (Up-counter, с прямым порядком счета), вычитающие (Down-counter, с обратным порядком счета), реверсивные (Up-Down-counter, реализуют как прямой, так и обратный порядок счета). По способу формирования выходного кода различают асинхронные и синхронные счетчики. Синхронные счетчики при изменении внутреннего состояния формируют все разряды выходного кода одновременно. Асинхронные счетчики при переходе от одного состояния к другому сначала устанавливают новое значение младшего разряда кода на выходе D_0, затем новое значение на выходе D_1 и т. д. В результате на выходах асинхронных счетчиков в переходных режимах присутствуют ошибочные коды. В интегральном исполнении на уровне СИС реализованы 4-разрядные счетчики с дополнительными входами установки в произвольное начальное состояние (параллельная загрузка) и выходами каскадирования (последовательное соединение счетчиков с целью увеличения разрядности). На рис. 22.19 представлен асинхронный 4-разрядный двоичный счетчик с типовыми входами управления. Счетчик работает в четырех режимах:

установка в 0 (при $R = 1$ значения сигналов на остальных входах безразличны);

параллельная загрузка (при $R = 0$, $C = 0$ код загрузки подается на входы DI);

счет в прямом направлении (при $R = 0$, $C = 1$, "—1" = 1 на вход "+1" поступает импульсная последовательность);

счет в обратном направлении (при $R = 0$, $C = 1$, "+1" = 1 на вход "—1" поступает импульсная последовательность).

Регистры предназначены для хранения многоразрядных двоичных слов. Различают регистры параллельные и последовательные. На рис. 22.20 представлено графическое изображение параллельного 8-разрядного регистра с дополнительной логикой управления. Регистр работает в следующих режимах:

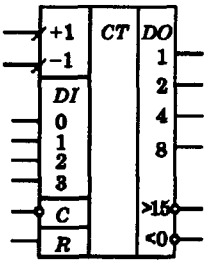


Рис. 22.19

запись данных (комбинация сигиалов $R = 1$, $EWR = 1$, $CS = 1$). Двоичное слово данных, предварительно установлеиное на входах DI, записывается во внутреиние триггеры RG. Даиные на выходах DO отсутствуют: выходиые буферы установлены в Z-состояние;

чтение даиных ($R = 1$, $EWR = 0$, $CS = 0$). Данные с выходов внутренних триггеров поступают на выходы DO, в то время как иа входах DI установлены другие логические уровни (т.е. считывается информация, записаиная ранее);

прямая передача ($R = 1$, $EWR = 1$, $CS = 0$). Даиные со входов DI поступают на выходы DO;

храиеиие даиных ($R = 1$, $EWR = 0$, $CS = 1$). Внутреиние триггеры хранят предварительио записаиные даиные, выходные буферы устаиовлены в Z-состояние;

установка в 0 всех разрядов регистра ($R = 0$, остальные сигналы безразличиы).

На рис. 22.21 представлена схема 4-разрядного последовательиого (сдвигающего) регистра с параллельными выходами $D_3 - D_0$. Если на вход C поступает импульсная последовательность, то значение входного сигнала $DI(t)$ в дискретные моменты времеии t_n появляется на выходе D_3 через четыре такта. В сдвигающем регистре информация из триггера T_{k-1} с каждым тактом передается в триггер T_k. Для последовательного ввода в n-разрядный регистр n-разрядного слова потребуется n тактов. Выход используется для последовательного вывода информации из регистра. Сдвигающие регистры используются для преобразования последовательного кода в параллельный и наоборот. В последнем случае регистр обладает специальиыми входами для записи информации в параллельном коде.

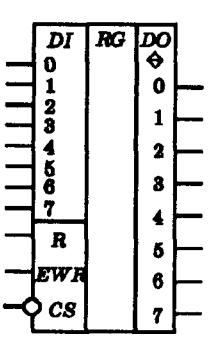


Рис. 22.20

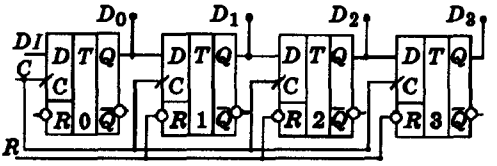


Рис. 22.21

МИКРОСХЕМЫ ПАМЯТИ

Микросхемы памяти предиазначены для записи, храиеиия и считываиия информации (оперативные запомииающие устройства — ОЗУ, RAM — Random Access Memory) либо только для хранения и считывания (постояиные запоминающие устройства, ПЗУ, ROM — Read Only Memory) [22.9; 22.10].

Данные, предназначенные для хранения в памяти, должиы быть упорядочеиы. Обычно они образуют массив, в пределах которого данные записываются и хранятся в виде двоичных чисел одииаковой длины: 1, 4, 8, 16 бит. Разрядиость даииых — это длина двоичного слова даииых, занимающего одну ячейку. Каждое число заиимает одну ячейку памяти, номер ячейки называют ее адресом. Поскольку адреса также записываются в виде двоичных чисел, количество ячеек памяти обычно выражается целой степеиью двойки: 32, 64 ячейки, 1 Кбайт = 1024 ячейки, 2 Кбайт = 2048 ячеек и т. д. Наибольшее число адресуемых ячеек даииого модуля (микросхемы) определяется разрядностью адреса. Микросхема памяти (рис. 22.22) должна иметь следующие группы выводов: даиные, адрес, выводы управления (выбор модуля, выбор режима записи или считывания).

Микросхемы ОЗУ с произвольной выборкой допускают обращеиие к любой ячейке памяти. В зависимости от сигнала на входе запись-считывание можио либо записать слово даииых в адресуемую ячейку, либо считать из ячейки записанное слово без разрушения информации. Микросхемы так называемых статических ОЗУ представляют собой организованное в виде матрицы множество триггеров. При наличии питання тригтер сохраняет свое состояние иеограиичеино долго; в случае отключения питаиия записаиная информация разрушается. Разновидность статического ОЗУ — память с режимом хранения иифомации при питаиии от резервиого источиика питания (SRAM — Standby RAM). Мощиость потреблеиия в этом режиме значительно ни-

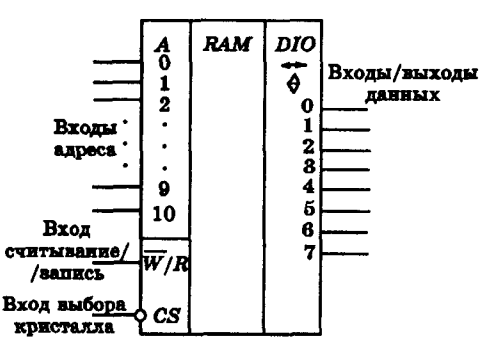


Рис. 22.22

же, чем в рабочем, однако считыванне и запнсь информации невозможны. Другая разновидность ОЗУ — регнстровая память. Она характеризуется дополнительными функциональнымн возможностями: сдвиг записанного слова вправо или влево в цепочке последовательных регнстров, преобразованне параллельного кода в последовательный и обратно как при записи, так и при считывании. В динамических ОЗУ элементом памяти служит микроконденсатор на полупроводниковой структуре. Из-за неизбежного саморазряда конденсатор способен хранить информацию в течение ограиичеиного времени (единицы миллисекунд), после чего требуется регенерация, т.е. восстановление уровня первоначально записанного сигнала. Вследствие этого динамические ОЗУ, имея преимущества перед статическими в плотности записи, уступают им в простоте системы обслуживания. Область применения динаммческих ОЗУ — вычислительные системы с большими объемами накапливаемой информации, где сложность регенерации компенсируется повышением удельных показателей ЗУ.

Постоянные запоминающие устройства представлены иескольким классами модулей. Они различаются функциоиальными возможностями:

ПЗУ масочного типа (ROM); память только для считывания. Содержимое записывается на заводе-изготовителе, оно не может быть удалено или заменено. Поэтому такие модули памяти используют для хранения наборов констаит, таблиц стандартных функций, преобразования стандартных кодов;

ПЗУ, программируемые пользователем (ППЗУ, OTPROM — One-Time Programmable ROM). Фуикционально модуль подобен чистой тетради, в которую могут быть внесеиы любые записи; повторное использование ППЗУ невозможно. ППЗУ, или однократно программируемые модули, допускают программирование путем пережигания перемычки в кристалле в рабочей позиции микросхемы. Если исходное состояние матрицы соответствует уровню 0 логического сигнала на выходе ячейки, то для записи 1 пережигаются перемычки в адресованных ячейках; при исходиом состояиии 1 пережигание перемычек записывает в ячейку 0;

репрограммируемые ПЗУ (РПЗУ). Модули такого типа могут использоваться иеоднократно, с этой целью записанная информация должна быть стерта, после чего возможно новое программирование. Получили распространение следующие разновидности РПЗУ: с ультрафиолетовым стиранием путем дозированиого облучения кристалла (EPROM — Erasable Programmable ROM) и с электрическим стиранием путем подачи на ячейки памяти соответствующих сигналов (EEPROM — Electrically Erasable Programmable ROM). Разновидностью последних являются схемы, выполнеиные по технологии FLASH (FLASH EEPROM). Схемы с электрическим стиранием допускают тысячи циклов перезаписи, с ультрафиолетовым — существенно меньше (десятки).

Для использования модулей ЗУ необходимо знать способы включения в схемах, виды и уровни подаваемых напряженнй, временные соотношения сигналов. В настоящем справочнике описываются основные виды сигналов, уровни напряжений и способы использования модулей ЗУ в схемах, однако следует иметь в виду, что для работы с модулями памяти требуется наличие достаточно сложной аппаратуры для генерации сигналов считывания информации и контроля содержимого. Поэтому практическое использование ЗУ требует большого объема дополнительной информации по каждому из типов ЗУ и соответствующей аппаратуры (программаторов, логических анализаторов, генераторов тестовых последовательностей). Эта информация не входит в объем первоначальных сведений по модулям ЗУ, поэтому читателя отсылаем к соответствующей справочной литературе [22.9, 22.10].

Применение модулей ОЗУ требует наличия третьего состояния — высокого сопротивления выхода. Если данный модуль (корпус микросхемы) выбран, т.е. сигиал *CS* соответствует активному уровню (активным у разных микросхем может быть как высокий, так и низкий потенциал), то вывод *DIO* подключается к входу *DI* или выходу *DO* соответствующей ячейки. Если ячейка не выбрана, сигнал *CS* соответствует пассивному уровню, вывод *DIO* находится в состоянии высокого сопротивления и не оказывает никакого влияния на другие связанные с ним выводы. При активном уровне вывода *DIO* и сигнале *W/R* запись-считывание, соответствующем записи в адресованной ячейке, запишется сигнал на входе *DI*. Для заполнения ячеек заданным содержанием необходимо осуществить следующую процедуру: установив режим *W*, последовательно подавать на вход *DI* биты сигнала, подлежащие записи, после установления уровня сигнала активиым уровнем стробирующего сигнала *CS* эти биты будут записаны в ячейки памяти по устаиовленному адресу *A*. Заполнив одну ячейку, устанавливают новый адрес, новые данные, которые должны быть записаны по следующему адресу. После того как запись закончена, можно, не отключая источника питания, сделать уровень *CS* пассивным. При этом модуль переходит в состояние высокого сопротивления, а потребление резко уменьшается. Для чтения ОЗУ устанавливается активный уровень *CS*, режим *R* и адресуется ячейка, содержимое которой считывается. На выходах битов данных *DO* устанавливаются уровни 0 или 1 в соответствии с записанной информацией, и эти данные могут восприниматься устройствами чтения. Устройства сиихроиизации обеспечивают необходимую последовательность и длительность сигналов управления и информациоиных. Обычно функции стробирования возлагаются на CS, он устанавливается в активное состояние на короткое время в соответствии с паспортом ОЗУ, когда остальные сигналы — *A*, *DI*, *DO*, *W/R* — успели установиться и поддерживаются в течеиие времени, достаточного для записи-считываиия.

В табл. 22.8 приведены данные для нескольких типов ОЗУ. Табл. 22.9 содержит данные по ПЗУ.

Таблица 22.8

Тип ИС ОЗУ	Информационная емкость (организация слов×разряды)	Время выборки, нс	U_{cc}, В	Технология изготовления
Статические ОЗУ				
537РУ10А	16К(2К×8)	290	5±10%	КМОП
537РУ17	64К(8К×8)	200	5±10%	КМОП
537РУ19	64К(64К×1)	70	5±10%	КМОП
К1500РУ480	16К(16К×1)	35	4,5±5%	ЭСЛ
К6500РУ1	1К(1К×1)	4	5±5%	ArGa
К531РУ11	64К(16К×4)	40	5±5%	ТТЛШ
Динамические ОЗУ				
КР565РУ6А	16К(16К×1)	120	5±5%	*n*-МОП
КР565РУ8А	256К(256К×1)	100	5±5%	*n*-МОП
КР565РУ9В	1М(1М×1)	150	5±5%	*n*-МОП

Таблица 22.9

Тип ИС ОЗУ	Информационная емкость (организация слов×разряды)	Время выборки, нс	U_{cc}, В	Технология изготовления
Масочные ПЗУ				
К555РЕ4	16К(2К×8)	110	5±5%	ТТЛШ
КР568РЕ3	128К(16К×8)	600	5±10%	*n*-МОП
КР1656РЕ4	64К(8К×8)	55	5±10%	ТТЛШ
К1809РЕ1	64К(4К×16)	300	5±5%	*n*-МОП
Однократно программируемые ПЗУ				
К155РЕ3	256(32×8)	50	5±5%	ТТЛ
К556РТ4	1К(256×4)	90	5±5%	ТТЛШ
КР556РТ7	16К(2К×8)	45	5±5%	ТТЛШ
КР556РТ6	64К(8К×8)	85	5±5%	ТТЛШ
КР565РТ6	64К(8К×8)	450	5±5%	*n*-МОП
Программируемые ПЗУ с электрической перезаписью информацни				
К558РР1	2К(256×8)	5000	5±5% −12±5%	*n*-МОП
К558РР22А	8К(1К×8)	350	5±5%	*n*-МОП
К558РР24А	8К(2К×4)	350	5±5%	*n*-МОП
К558РР4	64К(8К×8)	400	5±5%	*n*-МОП
КР1601РР3	16К(2К×8)	600	5±5% −12±5%	*p*-МНОП
КМ1609РР1	16К(2К*8)	350	5±5%	*n*-МОП
КМ1609РР21	32К(4К×8)	450	5±5%	*n*-МОП
КМ1609РР2	64К(8К×8)	300	5±5%	*n*-МОП
КМ1624РР1	256К(32К×8)	400	5±5%	*n*-МОП
Репрограммируемые ПЗУ с электрической записью информации и УФ-стиранием				
573РФ5	16К(2К×8)	450	5±5%	*n*-МОП
573РФ3	64К(4К×16)	120	5±5%	*n*-МОП
573РФ6А	64К(8К×8)	300	5±5%	*n*-МОП
573РФ7	256К(32К×8)	300	5±5%	*n*-МОП

Примечание. *n*-МОП и *p*-МОП — полевые структуры с индуцированным каналом *n*- и *p*-типа

ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ЦАП И АЦП)

Наличие средств для обработки аналоговых и цифровых сигналов с неизбежностью влечет за собой необходимость их взаимного преобразования. ЦАП служат для преобразования входной дискретной информации (в цифровом коде) в эквивалентный аналоговый сигнал Обычно этот сигнал имеет размерность напряжения, реже тока Преобразование код—аналог реализуется с помощью суммиро-

вания взвешеиых токов иа основе операциоииых усилителей [22.7; 22.8]. Передаточная характеристика идеального ЦАП описывается формулой

$$U_{вых} = KU_{оп}(a_0 \cdot 2^0 + a_1 \cdot 2^1 + \ldots + a_{n-1} \cdot 2^{n-1}),$$

где a_i — значение соответствующего разряда входного двоичного кода (0 или 1); n — число разрядов; $U_{оп}$ — опорное напряжение; K — коэффициент пропорциональности.

Для того чтобы поставить в однозначное соответствие коду значение тока, следует оргаиизовать суммирование взвешенных по двоичному закону токов, соответствующих разрядам $a_i = 1$. Алгоритм преобразователя должеи содержать следующие операции: формирование n взвешеиных токов; суммирование тех токов, которые должны входить в сумму с множителем 1; преобразование суммы токов в выходное напряжение ЦАП. Структурная схема ЦАП представлена на рис. 22.23. Формирование взвешенных токов производится одним из двух способов: подключением посредством полупроводниковых ключей прецизионных взвешеиных сопротивлений к источнику опорного напряжеиия $U_{оп}$; подключением прецизиоиной матрицы R—$2R$, в которой выходные токи соотносятся, как целые степени двойки. Сумма взвешенных токов несет информацию о преобразуемом коде. Она может использоваться либо непосредственно (преобразователь ток—код), либо с помощью схем иа осиове ОУ преобразоваться в выходное иапряжение. Коэффициент пропорциональности K определяется резистором $R_{о.с}$. Преобразователи кода напряжения имеют свойства прецизионного умножителя напряжения $U_{оп}$. Различают преобразователи с униполярным и биполярным выходным иапряжением. Для удобства сопряжения с микропроцессорными системами ЦАП содержат регистр для хранеиия преобразуемого кода.

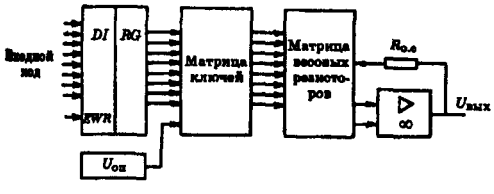


Рис. 22.23

Современные ЦАП в интегральном исполнении могут содержать в корпусе ИС как все составиые части, представленные на рис. 22 23, так и отдельные блоки. В последнем случае недостающие в составе интегрального ЦАП устройства должны быть выполнены навесиым монтажом.

Основиыми характеристиками ЦАП являются: число разрядов, номииальные выходные ток и напряжеиие, время установления выходиой величины, погрешности выходной величины, линейности преобразования [22.7; 22.8]. В табл. 22.10 приведеиы характеристики некоторых отечествеиных ЦАП.

АЦП предназначены для преобразования аналоговых сигналов в соответствующие им цифровые, т.е. для преобразоваиия сигналов с непрерывной шкалой в сигналы, имеющие дискретную шкалу значений. По структуре построения АЦП делятся на две группы: с применением ЦАП и без них [22.1; 22.2; 22.7; 22.8]. К первому типу следует отнести АЦП последовательного приближения и последовательиого счета. Ко второй группе — параллельные АЦП и АЦП двойного интегрирования. На рис. 22.24 дана структуриая схема n-разрядного АЦП последовательного приближения. На n-разрядный регистр последовательного приближения RG поступает тактовая частота от генератора G, который запускается в момент выборки устройством выборки и сравнения УВХ измеряемого сигнала $U_{вх}$ по фронту сигнала $START$. В первом цикле преобразования на выходе RG устанавливается код 10...0. Выходы RG управляют схемой ЦАП. В результате на выходе ЦАП будет сформировано иапряжение $U_{оп}/2$ [22.2]. Компаратор сравнивает $U_{ЦАП}$ с измеряемым напряжеиием $U_{вх}$, результат сравнения (1, если $U_{ЦАП} \le U_{вх}$, и 0, если $U_{ЦАП} > U_{вх}$) запоминается в старшем разряде регистра RG_n. Во втором цикле пре-

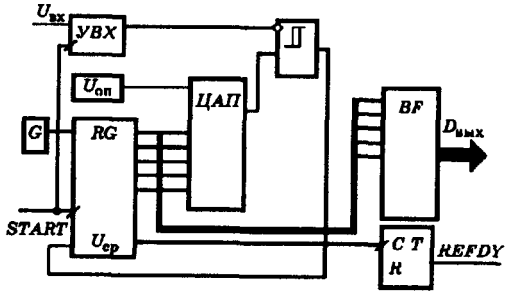


Рис. 22.24

Таблица 22.10

Тип ИМС	Число разрядов	Время установления	$U_{вых}$ ($I_{вых}$)	Совместимость с логическими сигналами	Структура
572ПА1	10	5 мкс	10 В*	ТТЛ, КМОП	Матрица ключей, матрица резисторов
572ПА2	12	15 мкс	10 В*	ТТЛ, КМОП	Регистр, матрица ключей, матрица резисторов
1108ПА1	12	400 нс	5 мА	ТТЛ	Матрица ключей, матрица резисторов
1118ПА1	8	40 нс	50 мА	ТТЛ, ЭСЛ	Матрица ключей, матрица резисторов
1118ПА2	10	80 нс	—1,024 В	ЭСЛ	Регистр, матрица ключей, матрица резисторов
1118ПА3	8	10 нс	20 мА	ЭСЛ	Источник $U_{оп}$, матрица ключей, матрица резисторов
1118ПА4	10	20 нс	—1,024 В	ЭСЛ	Регистр, матрица ключей, матрица резисторов

* При использовании внешиего операционного усилителя.

Таблица 22.11

Тип ИС	Число разрядов	Время преобразования	$U_{вх}$, В	Совместимость с логическими сигналами	Структура
572ПВ3	8	7,5 мкс	±10	ТТЛ	Последовательного приближения
572ПВ4	8	32 мкс	±10	ТТЛ, КМОП	Система сбора данных, восемь каналов, последовательный опрос, ОЗУ данных
1107ПВ2	8	100 нс	−2	ТТЛ	Параллельного типа, четыре типа выходного кода
1107ПВ3	6	20 нс	±2,5	ЭСЛ	Параллельного типа
1107ПВ4	8	30 нс	±2,5	ЭСЛ	Параллельного типа
1107ПВ5	6	20 нс	±2,5	ЭСЛ	Параллельного типа
1108ПВ2	12	2 мкс	5±2,5	ТТЛ	Последовательного приближения
1113ПВ1	10	20 мкс	10,24	ТТЛ	Последовательного приближения

образования регистр последовательного приближения формирует код RG_n 10...0. По истечении второго цикла будет сформирован разряд RG_{n-1} искомого кода. Схемотехника регистра последовательного приближения такова, что один цикл составляет два периода генератора G. Время измерения АЦП последовательного приближения $t_{изм} = 2(n+1)t_G$ (два периода служебные). АЦП последовательного приближения сочетают в себе ряд достоинств: возможность достижения высокого быстродействия (табл. 22.11); независимость времени измерения от значения входного сигнала; высокая разрядность; относительно невысокое потребление. Поэтому АЦП этого типа выпускаются не только в виде отдельных ИС, но и в составе управляющих однокристальных микроконтроллеров.

Самым высоким быстродействием обладают параллельные АЦП, структурная схема которых представлена на рис. 22.25. В АЦП параллельного типа используются 2^n-1 эталонных опорных напряжения, сформированных с помощью резистивного делителя. Входное измеряемое напряжение сравнивается одновременно со всеми возможными уровнями квантования с помощью 2^n-1 компараторов. Полученный на выходах компараторов код преобразуется дешифратором в n-разрядный двоичный код, причем один и тот же АЦП может иметь несколько законов преобразования (код прямой со знаком и без него, обратный, дополнительный, двоично-десятичный), которые определяются дополнительными

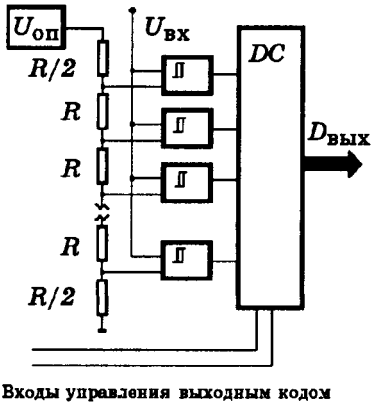


Рис. 22.25

разрядами управления. Платой за высокое быстродействие параллельных АЦП является относительно большая мощность потребления и меньшая разрядность по сравнению с АЦП последовательного приближения Характеристики некоторых типов отечественных АЦП приведены в табл 22.11.

ОДНОКРИСТАЛЛЬНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

Микроконтроллерами (МК) называют БИС, содержащие в одном кристалле все элементы микропроцессорной системы, необходимые для ее работы. При этом структура микропроцессорной системы МК ориентирована на решение задач локальной автоматизации различными типами устройств: управление электроприводами различной сложности, управление автомобильными двигателями, решение коммуникационных задач, задач обработки изображений, управление бытовыми приборами и индикаторными табло. Независимо от области применения каждый МК содержит центральный процессор, ПЗУ программ, ОЗУ данных, параллельные порты ввода-вывода, последовательный интерфейс, контроллер прерываний для приема запросов от внешних устройств. Основным отличием МК от универсальных средств обработки данных (персональных компьютеров, мини-ЭВМ) является физическая и логическая разделенность памяти программ и памяти данных, что исключает возможность замены прикладных программ МК во время работы. Кроме того, объем ПЗУ программ ограничен требованиями задач управления и для различных модификаций МК колеблется от 512 байт до 32 Кбайт.

Основная характеристика МК — разрядность центрального процессора Различают 8-разрядные, 16-разрядные и 32-разрядные МК, причем множество 8-разрядных наиболее обширно по функциональным модификациям. Ведущими фирмами в производстве 8-разрядных МК являются Intel, Motorola, Siemens, Microchip, Phillips. Следует отметить, что структура МК Intel 8051 оказалась настолько удачной, что сразу несколько фирм (Intel, Siemens, Phillips) выбрали ее как базовую для дальнейшего развития линии 8-разрядных МК. Такой подход значительно упрощает процесс разработки устройства управления на МК, поскольку переход от одной модификации МК к другой не сопровождается необходимостью освоения языка нового Ассемблера для его программирования. Собственными стандар-

тами постоянно развивающихся линий 8-разрядных МК обладают фирмы Motorola и Microchip.

Развитие однокристалльных МК идет по нескольким направлениям:

увеличение производительности центрального процессора с целью реализации в реальном времени все более сложных задач управления;

специализация МК путем включения в состав интерфейсных компонентов, ориентированных на определенные классы задач управления;

снижение стоимости и сокращение времени разработки путем перехода к модульной технологии.

Увеличение производительности процессорного ядра достигается несколькими способами. Во-первых, увеличением частоты синхронизации уже известных моделей МК. Для большинства 8-разрядных МК частота синхронизации колеблется в диапазоне 4÷16 МГц, фирма Siemens в ближайшее время выпустит МК C501/C502 с частотой синхронизации 25 и 40 МГц. Во-вторых, совершенствованием структуры процессорного ядра с целью расширения числа команд и уменьшения времени выполнения команд при неизменной тактовой частоте. Последнее достигается в цеитральиых процессорах, имеющих RISC (reduced instruction set computer)-архитектуру. Среди 8-разрядных МК RISC-архитектурой обладают МК фирмы Microchip. RISC-архитектура предполагает, что все команды имеют одинаковую длину и выбираются за один машинный цикл. Это широкий и весьма тщательно подобранный иабор команд, специально предназиаченный для задач управления, а также ввода и вывода. В-третьих, повышение быстродействия достигается увеличением длины разрядной сетки центрального процессора. Номенклатура 16-разрядных и 32-разрядных МК значительно уже, чем 8-разрядных. Среди 16-разрядных следует выделить семейство 8XC196 фирмы Intel, HC16 фирмы Motorola и C166/C167 фирмы Siemens, среди 32-разрядных — семейство модульных МК 68300 фирмы Motorola.

Повышение быстродействия центрального процессора не является единственным фактором обеспечения эффективного управления с использованием МК. Введение в состав МК интерфейсных компонент, которые не свойственны средствам вычислительной техники, позволяет значительно повысить качество управления даже для 8-разрядных МК. Независимо от фирмы-изготовителя МК практически все 8-разрядные МК обладают следующими типами интерфейсов.

1. Один или несколько (обычно до трех) 16-разрядных таймеров, которые имеют возможность формировать прерываиие по переполнению. Со счетчиками таймеров связаны подсистемы входиой фиксации (IC — Input Capture) и выходиого сравнения (OC — Output Compare). Подсистема входной фиксации служит для определения временных параметров внешних сигналов и позволяет записывать в специальный регистр содержимое счетчика таймера при перепаде уровня внешнего сигнала с выдачей запроса на прерывание или установкой соответствующего флага. Подсистема выходного сравнения предназначена для генерации импульсного сигнала с программируемыми временными параметрами. Она позволяет выдавать в линию порта 0 или 1 в момент равеиства содержимого счетчика и содержимого регистра сравнения.

2. Встроенный генератор ШИМ с числом каналов до четырех (редко восемь) с программно настраиваемой несущей частотой в диапазоне 1÷25 кГц и дискретностью регулирования длительности импульса обычно 8 и реже 10 бит.

3. Встроенная система слежения за временем выполнения программы COP WatchDog (Computer Operating Properly Watchdog — WD). Эта система служит для защиты от программных сбоев. При нарушении контрольного времени выполнения программы система вызывает прерывание и переход на начало программы.

4. Встроенный 8-разрядный АЦП последовательного приближения с временем преобразования 10÷÷30 мкс. Встроенный мультиплексор позволяет проводить измерения по одному из внешних аналоговых входов (число входов до восьми), а также измерять внутренние эталонные сигналы для контроля и юстировки.

5. Порты вывода с повышенной нагрузочной способностью линий (в том числе и выводов генератора ШИМ) для сопряжения с драйверами силовых полупроводниковых ключей.

6. Встроенные драйверы дисплея для различных типов индикаторов: светодиодных семисегментных, жидкокристаллических, газоразрядных.

7. Одии или несколько (до 3) битов контроля секретности, которые не позволяют считать программу из работающего в устройстве контроллера.

8. Встроенные схемы управления режимами низкого энергопотребления. В этих режимах часть внутренних ресурсов МК принудительно устанавливается в неработоспособное состояние, данные МК не могут быть изменены, но они не теряются. МК с режимами низкого энергопотребления предназначены для работы в устройствах с автономными источниками питания. Следует отметить, что часть МК имеет возможность работы в широком диапазоне источников питания 3÷7 В, т.е. при питании от батареек.

В табл. 22.12 приведены сведения о некоторых 8-разрядных МК различных фирм. Причем для каждой серии МК выбран наиболее простой и наиболее сложный МК с целью демонстрации их функциональных возможностей.

Аналогичные по функциональному назначению, но значительно более сложные по структуре интерфейсы имеют 16- и 32-разрядные МК.

Использование МК должно быть экономически выгодным в условиях их постоянного совершенствования и усложнения выполняемых функций. Снижение стонмости однокристалльных МК определяет переход к модульной архитектуре, которую реализует фирма Motorola в линиях 8-разрядных МК — MC68HC08, 16-разрядных — MCHC16 и 32-разрядных — MC68300. МК с традиционной структурой состоят из целого ряда функционально различных модулей, которые соединяются вместе для построения законченного микроконтроллера. Модульные МК используют ту же технологию, но делают еще один шаг по стандартизации геометричес-

Таблица 22.12

Тип МК (фирма)	ПЗУ	ОЗУ	Flash	Число таймеров	Число линий ввода-вывода	Последовательный интерфейс	АЦП	ШИМ
68HC705K1 (Motorola)	504 байт	32 байт	—	1	10	—	—	—
68HC705B6 (Motorola)	6K	176 байт	256 байт	1 2IC, 2OC, WD	32	1	8 каналов 8 бит	2 канала 8 бит
68HC705B32 (Motorola)	32K	528 байт	255 байт	1 2IC, 2OC, WD	32	1	8 каналов 8 бит	2 канала 8 бит
68HC11A0 (Motorola)	—	256 байт	—	1 3IC, 5OC, WD	22	2	8 каналов 8 бит	—
68HC11K4 (Motorola)	24K	768 байт	640 байт	1 4IC, 5OC, WD	62	2	8 каналов 8 бит	4 канала 8 бит
80C32 (Intel)	—	256 байт	—	3	32	1	—	—
80C51FA* (Intel)	8K	256 байт	—	3 5IC или 5OC, WD	32	1	—	5 каналов 8 бит
80C51SL-AH (Intel)	16K	256 байт	—	2	87	1	4 канала 8 бит	—
16C54A (Microchip)	512 байт	25 байт	—	1 WD	12	—	—	—
17C44 (Microchip)	8K	454 байт	—	3 WD	33	1	—	2 канала 10 бит

* Всего возможно пять различных устройств в любой комбинации: IC, OC, ШИМ

кой формы и межмодульиого интерфейса функциональных модулей. Каждый модуль разрабатывается таким образом, чтобы минимизировать возможные изменения в способе подключеиия к остальным модулям устройства, и имеет прямоугольную геометрическую форму со стандартными размерами на кристалле, в то время как в традиционных устройствах геометрическая форма фуикциональных модулей нерегулярна и определяется топологией каждого конкретного микроконтроллера, а интерфейс подключения модуля к другим элементам МК нестандартен.

В модульных МК это достигается с помощью межмодульной шины, которая является стандартным интерфейсом для всех внутренних модулей семейства МК MCHC16 и MC68300. Межмодульная шина состоит из 16 лиииий даниых, 24 адресных линий и многочисленных линий управления, которые доступны всем модулям в одиокристалльном МК. В общих чертах межмодульная шина выполняет функцию, подобную функции системной шины в любой компьютерной системе. Такая стандартизация не только на функциоиальном, ио и на геометрическом уровне позволяет сократить время на разработку и производство новой модификации МК.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ БИС

Применение современных стандартных БИС микропроцессоров, ЗУ, однокристалльных микроконтроллеров позволяет создать различные виды малогабаритной электронной аппаратуры, однако они не всегда удовлетворяют требованиям по быстродействию. Альтернативой являются специализированные БИС [22.11—22.13], которые могут придать изделиям уникальные свойства. Решая задачу выбора между стандартными и специализированными БИС, а также осуществляя выбор метода проектирования специализированной БИС, разработчик должен учитывать уровень сложности, быстродействие, время и стоимость разработки. Технико-экономический анализ выбора способа проектирования приведен в [22.13]. Специализированные БИС разделяют на два класса: заказные и полузаказные БИС.

Заказная БИС — это ИС, разработанная на основе стандартных или специально созданных элементов и узлов по функциональной схеме заказчика. Все топологические слои заказной ИС являются переменными, проектируются и изготавливаются по индивидуальным для каждого типа микросхем фотошаблонам. Среди заказных БИС выделяют полностью заказные микросхемы и БИС, спроекти-

рованные на основе стандартных элементов. Оптимизация конструкции полностью заказных ИС ведется на уровие отдельных компонентов, в то время как при разработке БИС на основе стандартных элементов отдельные фуикциоиальные узлы выбираются из заранее спроектироваиной и провереиной библиотеки элементов. В состав библиотеки входят элементы разной степени сложиости — от простейших логических элементов типа И-НЕ, ИЛИ-НЕ, триггеров до сложных умножителей и даже элементов микропроцессоров.

Полузаказные БИС представляют собой совокупность заранее спроектированных постоянной и переменной частей, структура которых определяется заказчиком. Среди полузаказиых БИС выделяют ИС на основе базовых кристаллов (БК) и программируемые пользователем логические интегральные схемы (ПЛИС). При разработке БИС на основе БК специализация в соответствии с требоваиями заказчика осуществляется на заключительном этапе производства за счет нанесения переменных слоев межсоединений [22.11].

Особое место среди специализированных ИС занимают ПЛИС, которые поставляются потребителю в конструктивно законченном виде, их специализация осуществляется путем программирования пользователем. В настоящее время наибольшим спросом пользуются ПЛИС, обладающие следующими характеристиками:

высокая логическая интеграция иа основе технологий КМОП;

быстродействие до 150 МГц;

возможность программирования (задание внутренней конфигурации) без программатора;

возможность многократного программирования с предварительным восстановлением первоначальной структуры ИС (процесс стирания).

По способу программирования и стирания различают следующие виды ПЛИС:

с электрическим программированием и электрическим стиранием (EEPROM). Оба процесса осуществляются с использованием специального программатора. При отсутствии напряжения питания ПЛИС сохраняют заданную структуру;

программируемые в системе (ISP). Такие ПЛИС имеют встроенный порт, подключаются к порту компьютера для реализации режимов программирования и стирания, которые выполняются непосредственно на рабочей плате и не требуют специального программатора При отключении напряжения питания ПЛИС сохраняют заданную конфигурацию;

ПЛИС на основе технологии статического ОЗУ (SRAM). Такие ПЛИС теряют заданную структуру при выключении питания. Для каждого сеанса работы ИС загружают программу конфигурации. Эту функцию может выполнять в активном режиме сама ПЛИС, используя в качестве источника информации ПЗУ. С другой стороны, загрузкой может управлять внешний процессор или микроконтроллер. Появляется возможность перепрограммировать ПЛИС непосредственно в устройстве в процессе работы.

С целью обеспечения надежного функционирования в особых условиях внешней среды некоторые семейства ПЛИС (например, MAX-7000 фирмы ALTERA, США) изготавливаются также в масочном исполнении. Тогда отладка изделия выполняется на обычной ПЛИС, а затем происходит замеиа кристалла "корпус в корпус".

В зависимости от степени интеграции современные ПЛИС имеют одну из трех структур:

ПЛИС с матричиой структурой содержат программируемые матрицы И, ИЛИ, триггеры;

ПЛИС с блочной структурой содержат большое количество блоков, как правило двух типов: логических и ввода-вывода. Логические блоки могут выполиять любую функцию четырех или пяти входных сигналов, а также содержат триггеры. Архитектура логических блоков позволяют реализовать быстродействующие логические операции;

ПЛИС сверхбольшой интеграции объединяют на одиом кристалле в законченные узлы, так же как ОЗУ, АЛУ, цифровой сигнальный процессор.

Для проектирования и отладки ПЛИС используют специализированные САПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

22.1. **Аналоговые** интегральные схемы: Справочник / А. Л. Булычев, В. Н. Галкии, В.А. Прохоренко и др. Минск: Беларусь, 1993.

22.2. **Цифровые** и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Ниссельсон, В. И. Кулешова и др. М.: Радио и связь, 1990.

22.3. **Гутников В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

22.4. **Шило В. Л.** Популяриые цифровые интегральные микросхемы: Справочник. — 2-е изд., испр. Челябинск: Металлургия, 1989.

22.5. **Логические** ИС КР1533, КР1554: Справочник. В двух частях. ТОО "БИНОМ", 1993.

22.6. **Пухальский Г. И., Новосельцева Т. Я.** Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах: Справочник. М.: Радио и связь, 1990.

22.7. **Федорков Б. Г., Телец В. А.** Микросхемы ЦПА и АЦП: фуикционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990.

22.8. **Микросхемы** памяти, ЦАП и АЦП: Справочник. — 2-е изд., стереотип. / О. Н. Лебедев, А-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-К. Багданскис и др. М.: КУбК-а,1996.

22.9. **Применение** интегральных микросхем памяти: Справочник / А. А. Дерюгин, В В. Цыркин, В. Е. Красковский и др.; Под ред. А. Ю. Горюнова, А. А. Дерюгина. М.: Радио и связь, 1994.

22.10. **Зарубежные** интегральные микросхемы: Справочник / А. В. Нефедов, А. М. Савченко, Ю. Ф. Феоктистов; Под ред. Ю. Ф. Широкова. М.: КУбК-а, 1995.

22.11. **Цифровые** интегральные микросхемы: Справочник / П.П. Мальцев, Н.С. Долидзе, М.А. Критенко и др. М.: Радио и связь, 1994.

22.12. **Шипулин С. Н.** Сверхбольшие ПЛИС — новый класс микросхем // Радио. 1993. N° 11. С. 2.

22.13. **Фей К. Ф., Парасковопулое Д. Е.** Технико-экономический анализ специализированных интегральных схем: современное состояние и перспективные тенденции // ТИИЭР. 1987. Т. 75. N° 6. С. 103—117.

Раздел 23

РЕЗИСТОРЫ, КОНДЕНСАТОРЫ И РЕАКТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

23.1 Резисторы 98
Общие сведения (98). Резистивные элементы и блоки резисторов (98). Пусковые и пускорегулирующие реостаты (102). Реостаты возбуждения (103) Выбор пускового реостата для пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (104).
23.2. Силовые конденсаторы 106
Общие сведения (106). Конденсаторы для электроустановок переменного тока промышленной частоты (107). Конденсаторы повышенной частоты (109). Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения (110). Фильтровые конденсаторы (112). Импульсные конденсаторы (113). Выбор элементов защиты конденсаторов и конденсаторных установок (114).
23.3. Реакторы 116
Назначение и классификация (116). Конструкции реакторов (116). Конструктивное исполнение реакторов (117). Основные параметры одинарных бетонных токоограничивающих реакторов (117). Основные параметры сдвоенных бетонных токоограничивающих реакторов (117). Параметры выпускаемых реакторов (119). Выбор токоограничивающих реакторов (119).
Список литературы 123

23.1. РЕЗИСТОРЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Резисторы широко применяются в разнообразных схемах управления электрическими силовыми установками, где выполняют различные функции. По назначению резисторы делятся на следующие основные группы:

а) нагрузочные — применяются для поглощения части электрической энергии цепи и преобразования ее в тепловую энергию, а также для регулирования нагрузки при испытании электрических устройств;

б) пусковые — предназначены для пуска электрических двигателей и ограничения их пускового тока, а также для его поддержания на заданном уровне при разгоне двигателя;

в) пускорегулирующие — кроме пуска электрических двигателей выполняют функции регулирования в известных пределах частоты вращения;

г) регулировочные и установочные (например, регуляторы возбуждения) — предиазначены для регулирования тока в обмотках возбуждения электрических машин, а также для его устаиовки на заданное значение;

д) тормозные — служат для снижения тормозного тока электрических машин, а также для поддержания его заданного значения в период торможения;

е) добавочные — предназначены для снижения напряжения на электрических устройствах, последовательно с которыми они включены;

ж) специальные (экономичные, балластные, нагревательные, разрядные, заземляющие, переходные, демпферные и др.) — имеют различные назначения в электрических силовых установках.

К резисторам, применяемым в силовых электроустановках, предъявляются требования, указанные в ГОСТ 9219-88 и в рекомендациях МЭК.

Резисторы с переменным сопротивлением называются реостатами.

РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И БЛОКИ РЕЗИСТОРОВ

Резисторы и резистивные элементы могут использоваться как автономно, так и в составе блоков или панелей резисторов [23.1—23.3].

Резисторы типа ЭС3 и ЭС10 предназначены для комплектования блоков резисторов серии *ЯС* (ТУ 16-527.218-80). Они различаются по номинальному току и номинальному сопротивлению.

Параметры ленточных резисторов типа ЭС3 приведены в табл. 23.1, резисторов типа ЭС10 — в табл. 23.2.

Проволочные трубчатые *резисторы серии ПТ* используются как добавочные в электрических цепях постоянного и переменного тока, работающих в закрытых помещениях (ТУ 16-527.198-80).

Технические данные резисторов серии ПТ приведены в табл. 23.3.

Литые плоские *резистивные элементы ГФ* применяются в блоках *резисторов типов СЖ, ЯС, ЯСГ и Е*. Технические параметры отечественных литых резистивных элементов в блоках резисторов типа СЖ приведены в табл. 23.4.

Вышеперечисленные резистивные элементы *ГФ* также используются в *блоках резисторов типов ЩС, ПП* и др. [23.3].

Блоки резисторов представляют собой электрические аппараты, состоящие из нескольких рези-

Таблица 23.1. Параметры ленточных резисторов типа ЭСЗ

Сопротивление резистора, Ом	Номинальный ток, А	Допустимое сопротивление на ступень, Ом	Масса, кг, не более
0,642	23,6	0,043	0,55
0,481	27,4	0,032	0,59
0,402	30,1	0,027	0,63
0,320	33,8	0,021	0,66
0,261	37,9	0,017	0,74
0,200	46,6	0,013	0,81

Таблица 23.2. Параметры резисторов типа Э10

Сопротивления резистора, Ом	Номинальный ток, А	Минимально допустимое количество витков между отводами, шт.	Масса, кг, не более
0,0777	109,0	2	11
0,1000	93,5	3	14
0,1500	76,0	3	14
0,2340	58,0	4	22
0,3120	54,0	4	22
0,4120	46,0	5	28
0,5900	38,0	5	28
0,8160	28,5	5	28
1,0700	27,5	4	22
1,3700	23,5	5	28

сторов, которые соединены по определенной схеме Они различаются по типу резистивных элементов, входящих в их комплект.

К блокам резисторов с литыми плоскими резистивными элементами относятся блоки СЖ с двухрядным расположением элементов (рис. 23 1). Такой блок состоит в зависимости от назначения из 56—112 резистивных элементов *1*, закрепленных на изолированных стяжных шпильках *2* между двумя штампованными рамами *3*, выполненными из листовой стали толщиной 3—4 мм. Количество резистивных элементов в одном ряду не должно превышать 30—50. Просвет между ними по условиям теплоотдачи выбирается равным 10—15 мм. При использовании блоков СЖ в высоковольтных цепях они изолируются от заземленных частей специальными подвесками *4*, укрепленными на опорных изоляторах *5*. Выводы *6* блоков выполнены стальными или медными шинами, зажатыми между резистивными элементами.

Основные технические данные блоков резисторов СЖ следующие:

Общее сопротивление, Ом . . . . . 0,1—10
Номинальное напряжение, В . 220—4000
Продолжительный ток, А . . . . . 46—600
Габариты (максимальные), мм . . 280×740×750
Масса, кг . . . . . 80—225
Вентиляция . . . . . Естественная
Форма исполнения . . . . . Не защищенная

Блоки резисторов типа ЯС (ТУ 16-527.218-80) предназначены для эксплуатации в силовых электрических цепях и в цепях управления переменного

Таблица 23.3. Резисторы серии ПТ

Тип	Номинальная мощность рассеяния, Вт	Диапазон сопротивлений, Ом	Размеры, мм			Масса, г
			наружный диаметр	внутренний диаметр	длина	
ПТ-8Т2	8	3,9—2200	15	6	35	20
ПТ-16Т2	16	3,9—5600	15	6	80	31
ПТ-25Т2	25	3,9—5600	26	16	80	56
ПТ-50Т2	50	8,2—15000	30	20	125	96
ПТ-75Т2	75	8,2—33000	30	20	175	135

Таблица 23.4. Литые резистивные элементы СЖ

Тип	Сопротивление при 20 °С, Ом	Продолжительный допустимый ток, А	Кратковременная токовая нагрузка, А		Постоянная времени, мин	Масса, кг
			10 мин	5 мин		
СЖ60	0,0044	220	360	465	14-16	1,77
СЖ61	0,0057	190	325	420	14-16	1,45
СЖ62	0,0075	160	270	360	14-16	1,5
СЖ63	0,0095	140	225	310	14-16	1,3
СЖ64	0,0145	120	190	255	14-16	1,3
СЖ65	0,0215	95	135	200	14-16	1,2
СЖ66	0,0325	72	100	150	14-16	1,3
СЖ67	0,0495	60	75	115	14-16	1,2
СЖ68	0,06	55	60	100	14-16	1,3
СЖ69	0,91	46	50	80	14-16	1,3

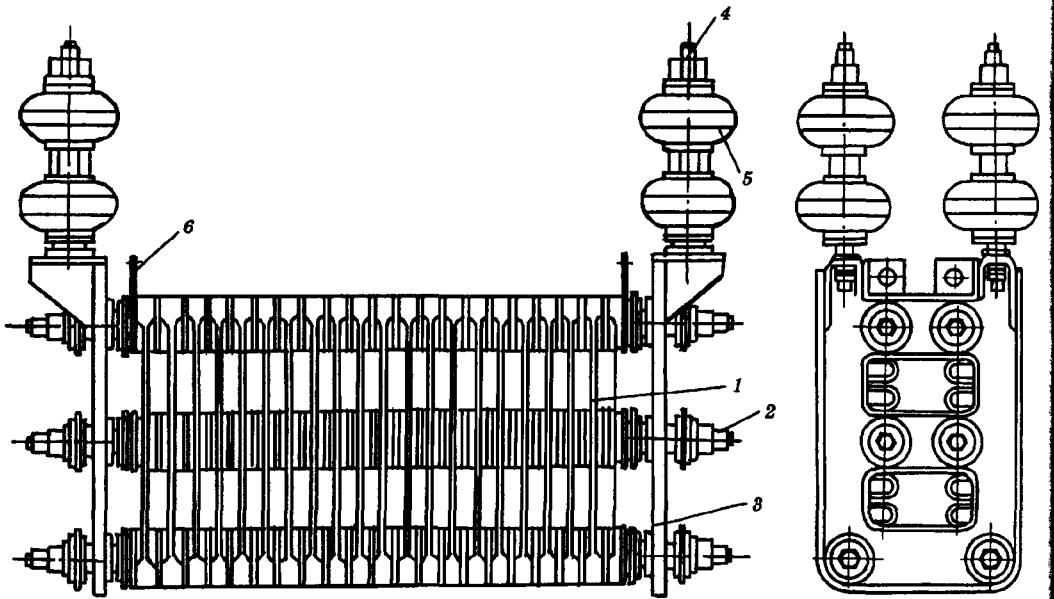


Рис. 23.1. Блок резисторов и резистивных элементов СЖ

тока частоты 50 и 60 Гц напряжением до 660 В, постоянного тока напряжением до 440 В в качестве балластных, нагревательных, добавочных, пускорегулирующих, тормозных, разрядных и др. Блоки типов ЯС191 и ЯС192 предназначены для эксплуатации в силовых цепях с напряжением до 11000 В относительно земли и применяются, главным образом, в качестве тормозных резисторов к синхронным двигателям.

Блоки ЯС3, ЯС4 — стандартизованные, с резисторами типа ЭС3 (ЯС3) и ЭС10 (ЯС4). В блоках ЯС3 резисторы соединяются попарно, при этом начало и конец резистора выводятся на планку с выводами. В блоках ЯС4 схема соединений резисторов различна.

Блоки ЯС101, ЯС202 — нестандартизованные, с различным количеством резисторов как по сопротивлениям, так и по токам нагрузки.

Блоки типов ЯС111, ЯС112, ЯС121, ЯС122, ЯС123, ЯС131, ЯС132, ЯС133, ЯС134 различаются количеством этажей и количеством резисторов. Каждый этаж блока имеет самостоятельный каркас.

Блоки ЯС211 выполнены в подвесном исполнении.

Блоки ЯС191, ЯС192 состоят из четырех отдельных блоков типов ЯС101 и ЯС102 соответственно, собранных в одну четырехэтажную колонку и установленных на четырех опорных изоляторах, закрепленных на раме, являющейся основанием блоков. Блоки первого и второго, а также третьего и четвертого этажей попарно скреплены между собой.

Блоки ЯС4У3 собраны в одну четырехэтажную колонку, укрепленную на опорных изоляторах.

Основные технические данные блоков резисторов типа ЯС4У3 приведены в табл. 23.5.

Блоки резисторов ЯСВ-40-0,5К выполнены во взрывобезопасном исполнении со встроенными контакторами-короткозамыкателями, либо без них, предназначены для работы во взрывоопасных средах и применяются в качестве пускорегулирующего резистора для асинхронных двигателей с фазным ротором ленточных конвейеров и других подъемно-транспортных устройств.

Примером исполнения блока резисторов из штампованных плоских резистивных элементов является *блок СВ*, состоящий из элементов ШЭ (ТУ 527.110-88Е).

Блоки резисторов СН (ТУ 16-527.071-75Е) выполнены аналогично блокам СВ, но в них отсутствует дополнительная корпусная изоляция, так как они рассчитаны на работу в цепях низкого напряжения с постоянным напряжением 440 В или переменным 550 В.

Основные технические данные блоков резисторов СВ и СН приведены в табл. 23.6.

На базе ленточных штампованных резистивных элементов изготовляются блоки резисторов типа ЛФ, которые используются в цепях с относительно большими токовыми нагрузками (порядка 100 — 500 А) при напряжении выше 1000 В и в случаях, когда при большом количестве ступеней требуется небольшое сопротивление (0,005-1,0 Ом), (табл. 23.7).

Наиболее распространенными блоками резисторов общепромышленного и специального назначения являются *блоки БТС-1, ББС-2, БКФ, БЛФ-1, БЛФ-2, БТС-7*. Они широко используются в электротехнических устройствах в качестве пусковых, тормозных, балластных и других резисторов для крупных электрических двигателей, электровозов, тепловозов и т. д.

Основные параметры вышеперечисленных блоков резисторов приведены в табл. 23.8.

Таблица 23.5. Параметры блоков резисторов ЯС4У3

Номинальное сопротивление блока, Ом	Номинальный ток, А				Масса, кг, не более
	при продолжительном режиме	при повторно-кратковременном режиме с относительной продолжительностью включения, ПВ %			
		20	40	70	
0,097	218,0	411,32	324,40	257,36	22
0,125	187,0	367,38	282,48	221,30	24
0,187	152,0	277,36	222,30	178,82	21
0,292	116,0	227,88	175,22	137,26	23
0,388	109,0	205,66	162,20	128,68	21
0,500	93,5	183,69	141,24	110,65	23
0,750	76,0	138,68	111,60	89,41	20
1,170	58,0	113,94	87,61	68,63	22
1,560	54,5	103,83	81,10	64,34	21
2,060	46,0	88,63	69,01	54,39	21
2,950	38,0	69,34	55,80	44,70	20
4,080	28,5	51,53	41,66	33,49	19
5,350	27,5	39,28	35,94	31,46	17
6,850	23,5	36,66	31,14	27,19	18

Таблица 23.6. Блоки резисторов СВ и СН

Тип	Номинальный ток, А	Мощность, кВт	Количество резистивных элементов	Максимальное число ступеней	Масса, кг
Блоки СВ					
СВ-1У3	100	5,6	28	8	80
СВ-2У3	100	8,0	40	8	94
СВ-3У3	100	9,6	48	12	110
СВ-4У3	100	12,0	60	12	125
СВ-5У3	200	12,0	200—240	12	159
СВ-6У3	200	17,6	300—340	12	208
Блоки СН					
СН-1	100	1,4	7	8	16
СН-2	100	2,0	10	8	20
СН-3	100	2,4	12	12	22
СН-4	100	3,0	15	12	26
СН-5	200	3,0	50—60	12	36
СН-6	200	4,4	75—80	12	48
СН-12	400	12	6	17	140
СН-16	400	16	8	17	160
СН-20	400	20	10	17	185
СН-24	400	24	12	17	210
СН-28	400	28	14	17	240
СН-2/21	50	3,8	19	10	42
СН-3/31	200	6,8	34	10	68
СН-3/32	300	7,2	36	10	70
СН-4/31	400	9,0	45	10	85

Таблица 23.7. Блоки резисторов ЛФ

Тип	Количество резистивных элементов	Число ступеней резистора	Сопротивление ступеней резисторов, Ом	Продолжительный ток, А	Номинальное напряжение, В	Масса, кг
ЛФ-238	4	6	0,22 0,037 0,019	190 265 400	2000	46,5
ЛФ-269	3	9	0,351 0,132 0,089	100 150 200	3000	46,9

Таблица 23.8. Блоки резисторов

Тип	Количество резистивных элементов	Сопротивление ступени, Ом	Полная мощность, кВт	Максимальная рабочая температура, °С	Масса, кг
БТС-1	12	1,52	2340	600	1020
ББС-2	6	0,52	745	600	505
БКФ	280	0,2—21	2800	350	3150
БЛФ-1	9	2,88	140	450	250
БЛФ-2	9	4,05	220	450	240
БТС-7	5	3,32	1200	750	750

ПУСКОВЫЕ И ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИЕ РЕОСТАТЫ

Пусковые и пускорегулирующие реостаты бывают с естественным и масляным охлаждением.

Они подразделяются по назначению, условиям пуска, наличию или отсутствию электрической защиты и роду привода.

Основными техническими параметрами пусковых и пускорегулирующих реостатов являются:

номинальное напряжение. Согласно ГОСТ 21128-83 они должны выбираться из ряда напряжений: для пусковых реостатов — 110, 220 и 440 В, для пускорегулирующих реостатов — 110 и 220 В;

номинальные токи коммутирующего устройства, которые выбираются из ряда (ГОСТ 6827-76) 10; 16; 20; 25; 31,5; 40; 63; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400 А.

В зависимости от мощности управляемого электродвигателя изменяется число ступеней реостатов (предварительных и пусковых).

К реостатам этого типа относятся *реостаты серии РП и РЗП* (ТУ 16-527.074-75Е). Они предназначены для управления электродвигателями постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до 19 кВт при напряжении сети 110 В и до 42 кВт при напряжении сети 220 или 440 В. Реостаты осуществляют пуск электродвигателя путем изменения сопротивления в цепи якоря.

Реостаты серии РЗР предназначены для пуска и регулирования частоты вращения вверх от номинальной электродвигателей постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до 19 кВт при напряжении сети 110 В и до 36 кВт при напряжении сети 220 В и постоянной мощности на валу двигателя.

Реостаты имеют электрическую защиту: РП — минимальную; РЗП, РЗР — минимально-максимальную. Реостаты типа РП состоят из проволочных резистивных элементов типов СН, СНл и ЦФ. Технические данные пусковых и пускорегулирующих реостатов типов РП, РЗП и РЗР приведены в табл. 23.9.

Схема соединения пускового реостата типа РП-2511 с сетью и электродвигателем приведена на рис. 23.2.

Перед пуском электродвигателя стрелка маховичка должна находиться против надписи *Стоп*. Для пуска электродвигателя медленно переводят маховичок реостата слева направо из положения *Стоп* в положение *Ход*. Во избежание перегорания пускового резистора необходимо задерживать маховичок на каждом пусковом положении реостата не более 1,5—2 с. Цепь электродвигателя замыкается при включении контактора, который остается включенным на все время работы электродвигателя.

После включения контактора в цепь его катушки вводится экономический резистор *СЭ*, сопротивление которого выбирается из расчета снижения тока катушки до значения, достаточного для созда-

Таблица 23.9 Пусковые и пускорегулирующие реостаты РП, РЗП и РЗР

Тип	Номинальный ток, А	Потребляемая мощность, кВт	Число ступеней		Масса, кг
			пусковых	регулировочных	
РП-2511	31,5	0,15	4	—	5,5
РЗП-2	40	0,45	7	—	12,0
РЗП-2А	40	0,9	7	—	14,0
РЗП-3	125	0,6	8	—	21,0
РЗП-3А	125	1,2	8	—	27,0
РЗП-4	200	1,5	12	—	52,0
РЗП-4А	200	2,5	12	—	55,0
РЗП-4Б	200	3,6	12	—	60,0
РЗП-4В	200	4,6	12	—	65,0
РЗР-21	40	0,45	6	10	12,0
РЗР-21А	40	0,9	6	10	14,0
РЗР-31	125	0,6	7	15	22,0
РЗР-31А	125	1,2	7	15	25,0
РЗР-31Б	125	1,8	7	15	29,0
РЗР-42	200	2,5	10	20	50,0
РЗР-42А	200	3,6	10	20	55,0
РЗР-42Б	200	4,6	10	20	60,0

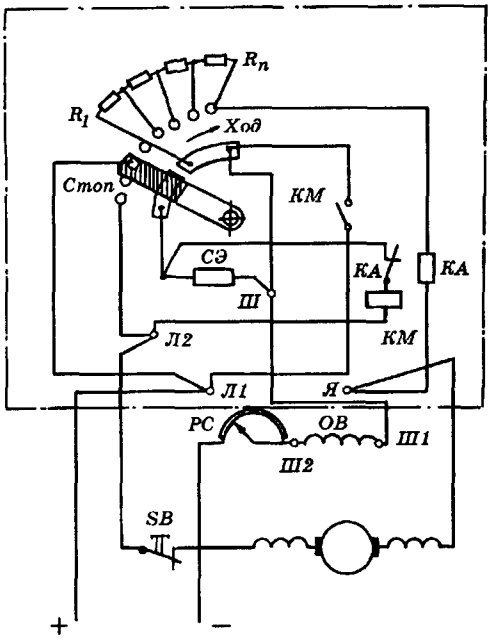


Рис. 23.2. Схема пускорегулирующего реостата типа РП-2511

КМ — контактор; КА — реле максимального тока; РС — реостат возбуждения, СЭ — экономический резистор в цепи катушки контактора, R_1, R_2, , R_n — контакты пускового резистора, *Л1* и *Л2* — зажимы, присоединяемые к цепи; *Я* — вывод, присоединяемый к якорю электродвигателя, *Ш* — вывод, присоединяемый к параллельной обмотке возбуждения *ОВ* электродвигателя; *Ш1*, *Ш2* — выводы обмотки возбуждения; *SB* — кнопка управления

ния необходимого усилия, удерживающего якорь магнитной системы контактора во включенном положении. При снижении напряжения в сети до 25—50 % своего номинального значения или при полном его исчезновении контактор отключает электродвигатель от сети

Повторное включение контактора, а следовательно, и новый пуск электродвигателя возможны только после возвращения щетки реостата в положение *Стоп* и последующего поворота маховичка в положение *Ход*.

Максимальное электромагнитное реле *КА* постоянного тока типа ЭРЭ-76А мгновенного действия срабатывает при значении тока в цепи электродвигателя, равном току уставки реле, и при этом размыкает своими контактами цепь втягивающей катушки контактора. Максимальное реле допускает регулировку тока уставки в пределах $(1{,}5 \div 3)I_{ном}$.

Остаиовка электродвигателя и отключение его от сети производятся быстрым поворотом маховичка против часовой стрелки в положение *Стоп*.

Реостаты РЗП по конструктивиому исполиеиию и осиовным техническим характеристикам аиалогичны реостатам РП. Отличаются наличием в них в качестве реле максимальной защиты реле типа ЭРЭ-71 вместо РЭ-72.

Реостаты пусковые маслонаполненные серии РМ металлические переменного тока общего назначения предназначены для пуска трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором путем выведения резистора из цепи ротора (ТУ 16-527.101-76).

Маслонаполненные реостаты рассчитаиы иа два-три пуска (с холостого состояния). Следующие пуски, производимые подряд, должны быть с паузами не менее двойной продолжительности одного пуска.

Основные технические параметры реостатов РМ даны в табл. 23.10.

РЕОСТАТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Реостаты возбуждения предназначеиы для регулирования напряжения генераторов постоянного и переменного тока, частоты вращения двигателей постоянного тока, а также тока в различиых электрических цепях при иапряжении в цепи возбуждения, не превышающем 440 В.

По роду привода реостаты возбуждения разделяются иа реостаты с непосредственным ручиым приводом, с дистанциоииым ручным приводом и с двигательным приводом.

Основными типами реостатов возбуждения являются *РВ, РВМ, РТМ, МР, РЗВ, РПВ, РШН, РШНД и РШМ*.

В цепях возбуждения двигателей и генераторов постоянного и переменного тока с напряжением 440 В применяются реостаты типов РЗВ, МР, РВМ, РТМ и РПВ мощностью от 0,3 до 90 кВт (табл. 23.11).

Отличительной особенностью реостатов возбуждения является отсутствие в них аппаратов максимальной и минимальной защиты.

Реостаты РЗВ имеют мощность от 0,3 до 4,5 кВт; МР — от 18 до 90 кВт; РВМ и РТМ — от 2 до 90 кВт;

Таблица 23.10. Пусковые реостаты РМ

Тип	Номинальный ток, А	Мощность двигателя, кВт	Максимально допустимое напряжение, В	Число ступеней резистора	Масса без масла, кг
РМ-1531У3	210 250	24,5; 29,5; 40 50; 55	400	8	23,5
РМ-1651У3	500	150; 175	600	9	70,0
РМ-16541У3	400	75; 100	600	9	70,0
РМ-16641У3	400	100	600	9	80,0
РМ-1671У3	750	300; 410; 500	1200	11	180,0
РМ-16761У3	600	200; 300	1000	10	145,0

Таблица 23.11. Реостаты возбуждения

Тип	Мощность, кВт	Номинальный ток, А	Максимальное число ступеней	Число резистивных элементов	Масса, кг
РВ-5101	0,285	20	10	—	4,0
РВ-5102	0,57	20	10	—	5,7
РВ-5103	0,855	20	24	—	7,0
РВ-5222У3	0,84	20	30	—	10,0
РВ-5233У3	2,52	20	30	—	31,0
РВ-5241У3	3,5	40	30	—	48,0
РВМ-1	2,0	30	100	27	56,0
РВМ-1А	4,0	30	100	54	65,0
РВМ-1Б	6,0	30	100	81	74,0
РВМ-2	18,0	60;120	92;130	6	175,0
РВМ-3	54,0	60;120	92;130	18	400,0
РТМ-2	18,0	120	72	6	175,0
РТМ-3	54,0	120	72	18	400,0
МР-120	18,0	125; 350	34; 44	6	160,0
МР-160	24,0	125; 350	34; 44	8	185,0
МР-200	30,0	125; 350	34, 44	10	205,0
МР-240	36,0	125; 350	34; 44	12	230,0
МР-280	42,0	125; 350	34; 44	14	255,0
МР-360	54,0	125; 350	34; 44	18	385,0
МР-440	66,0	125; 350	34; 44	22	435,0
МР-600	90,0	125; 350	34; 44	30	540,0
РЗВ-01А	0,3	15	32	4	6,5
РЗВ-01Б	0,45	15	32	6	8,0
РЗВ-11Б	0,65	15; 25	40; 66; 96	9	11,5
РЗВ-21А	0,9	15; 25	60; 96	12	16,5
РЗВ-31А	1,2	15	92	16	25,0
РЗВ-41А	2,5	25; 40	100; 120	10	44,0
РПВ-0,1	0,6	10	2×17	8	16,0
РПВ-0,2	0,6	10	2×17	8	16,0
РПВ-11	0,9	10	2×17	12	19,0
РПВ-12	0,9	10	2×17	12	19,0

РПВ — от 0,6 до 0,9 кВт; РВ — от 0,285 до 3,5 кВт (ТУ 16-527.072-75 и ТУ 16-527.171-72).

Реостаты возбуждения РВМ и РТМ снабжены электроприводом, связанным червячной передачей с подвижной системой коммутирующего устройства. Предусмотрено и ручное управление реостатом. Исполнение — открытое

Реостаты МР выполнены по схеме «без отключения».

Реверсивные реостаты РПВ предназначены для регулирования и изменения направления тока возбуждения генераторов постоянного тока, работающих в системе генератор-двигатель.

Выполняются реостаты по схеме с независимым возбуждением от сети напряжением до 220 В и рассчитаны на продолжительный режим работы.

Реостат РПВ может регулировать ток возбуждения в широких пределах от номинального до нуля, но плавность регулирования ограничена 17 ступенями

Реостаты возбуждения РШН, РШНД и РШМ предназначены для регулирования напряжения и поддержания постоянства напряжения генераторов и преобразователей и работают в цепях напряжением до 230 В и мощностью до 300 Вт.

Реостаты включаются в шунтовую цепь возбуждения генератора (преобразователя) последовательно с обмоткой возбуждения Схема соединения реостатов типов РШНД-2, РШНД-3, РШНД-3Т с генератором приведена на рис 23 3.

ВЫБОР ПУСКОВОГО РЕОСТАТА ДЛЯ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Известно, что если двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением включить в сеть с полным напряжением, то при неподвижном якоре ток в цепи превысит 20-кратное значение от номинального, что опасно для самого двигателя

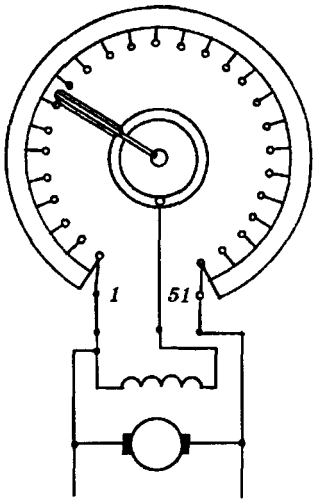


Рис. 23.3. Электрическая схема включения шунтового реостата

[23.1]. С целью уменьшения тока двигателя и возможности его запуска с заданным моментом на валу требуется подобрать пусковой резистор, рассчитать сопротивления его ступеней, их количество, проверить тепловой режим работы подобранного резистора.

Выбор пусковых резисторов осуществляется в зависимости от:

иомиального напряжения электродвигателя;

номинального тока электродвигателя, для которого предназначен реостат;

общего сопротивления реостата в начале пуска;

мощности электродвигателя, для которого предназначен реостат;

характера нагрузки при пуске: полная или половинная нагрузка на валу двигателя.

Прежде чем выбирать пусковой реостат, согласно вышеописанным требованиям, необходимо провести поверочный расчет резистора, предназначенного для пуска двигателя.

Пусть требуется подобрать пусковой реостат для крапово-металлургического двигателя постоянного тока серии МП-51 на номинальное напряжение 220 В; номинальную мощность 23 кВт; номинальный ток 120 А.

Режим работы: кратковременный и повторно-кратковременный (ПВ = 25 %).

Для двигателей малой и средней мощности при напряжении 220 В целесообразно использовать схему запуска рис. 23.4, *а* с небольшим числом ступеней сопротивления пускового реостата.

После включеиия лиией ного контактора *КМ1* его замыкающиеся контакты *КМ1.1* и *КМ1.2* подают напряжение в цепь якоря и пускового реостата.

Для двухступенчатого пуска двигателя, используя графический способ расчета сопротивлений пусковых резисторов r_1 и r_2, определяем сопротивления ступеней резистора, если номинальиое сопротивление двигателя

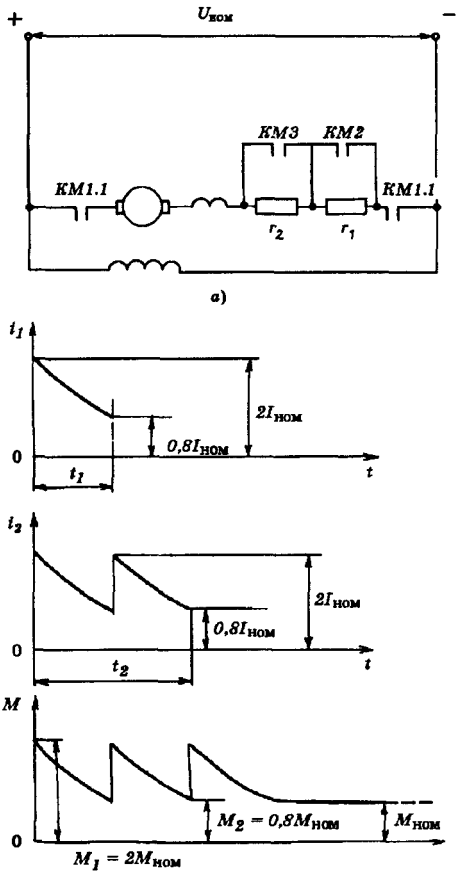


Рис. 23.4. Схема включения пусковых резисторов *(а)* и пусковые характеристики двигателя параллельного возбуждения *(б)*

$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = \frac{220}{120} = 1{,}84 \text{ Ом}.$$

Соответственно, сопротивление первой и второй ступеней резистора составит:

$$r_1 = 0{,}55 \text{ Ом}, \; r_2 = 0{,}22 \text{ Ом},$$

а времена включения ступеней резисторов равны

$$t_1 = 1{,}35 \text{ с}, \; t_2 = 1{,}9 \text{ с}.$$

Изменение токов в якоре i_1 и i_2 и вращающего момента M в функции времени представлено на рис. 23.4, *б*.

Максимально допустимый пусковой ток выбран из условий коммутации контактного аппарата

$$I_1 = 2\, I_{ном}.$$

Минимально возможный пусковой ток принят

$$I_2 = 0{,}8\, I_{ном}.$$

На рис. 23.4, *б*, t_1 — момент включения контактора КМ3; t_2 — момент включения контактора КМ2.

Согласно предварительным результатам расчета и принятым допущениям определим эквивалент-

ный по превышению температуры ток для ступеней пускового реостата двигателя, выбранного для его пуска. Как правило, постоянная времени τ нагрева резистора значительно превосходит времена переключения ступеней реостата. Принимаем $\tau = 250$ с, что характерно для рекомендуемого типа резистора.

Поэтому согласно [23.1] эквивалентный по превышению температуры ток для первой ступени реостата

$$I_{p1} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}};$$

$$I_1 = 2 \cdot 120 = 240 \text{ А}; \; I_2 = 0{,}8 \cdot 120 = 96 \text{ А};$$

$$I_{p1} = 173{,}1 \text{ А}.$$

Считаем рабочий период трехкратным и для резистора r_1

$$t_{p1} = 3\, t_1 = 3 \cdot 1{,}35 = 4{,}05 \text{ с}.$$

При кратковременном режиме работы находим эквивалентный длительный ток $I_{экв.дл}$ резистора r_1, зная соотношение $t_{p1}/\tau = 4{,}05 / 250 = 0{,}016$ и зависимость, представленную на рис. 23.5:

$$I_{экв.дл} = 0{,}13\, I_{p1} = 22{,}5 \text{ А}.$$

Для резистора r_2

$$t_{p2} = 3\, t_2 = 3 \cdot 1{,}9 = 5{,}7 \text{ с}.$$

Эквивалентный ток для второй ступени реостата согласно [23.1]

$$I_{p2} = \sqrt{\frac{(I_1^2 + I_2^2 + I_1 \cdot I_2) t_1 + (I_1^2 + I_2^2 + I_1 \cdot I_2) t_2}{3 (t_1 + t_2)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 \cdot I_2}{3}} = I_{p1},$$

т.е., эквивалентный ток резисторов r_2 и r_1 одинаковый. Зная длительность обтекания током резистора r_2 ($t_{p2} = 5{,}7$ с) с помощью кривой рис. 23.5, находим эквивалентный длительный ток для $t_{p2}/\tau = 5{,}7/250 = 0{,}023$:

$$I_{экв.дл} = 0{,}16 \cdot I_{p2} = 27 \text{ А}.$$

Для реализации предложенного режима пуска двигателя с учетом эквивалентных длительных токов ступеней реостата может быть рекомендован пусковой реостат серии РП-2511, имеющий четыре ступени регулирования, рассчитанный на номинальный ток 31,5 А и потребляемую мощиость 0,15 кВт.

Он допускает 100 отключений с интервалом 5 мин при двухкратном номииальном токе электродвигателя. Проверим работу реостата в повторно-кратковремеином режиме с заданной ПВ%.

Эквивалентный длительный ток резисторов в этом случае определяется согласно полученным соотношениям и зависимости рис. 23.5:

$$\frac{t_{p1}}{\tau} = 0{,}016; \; I_{экв.дл} = 0{,}51 \cdot 173{,}1 = 88{,}3 \text{ А};$$

$$\frac{t_{p2}}{\tau} = 0{,}023; \; I_{экв.дл} = 0{,}512 \cdot 173{,}1 = 88{,}6 \text{ А}.$$

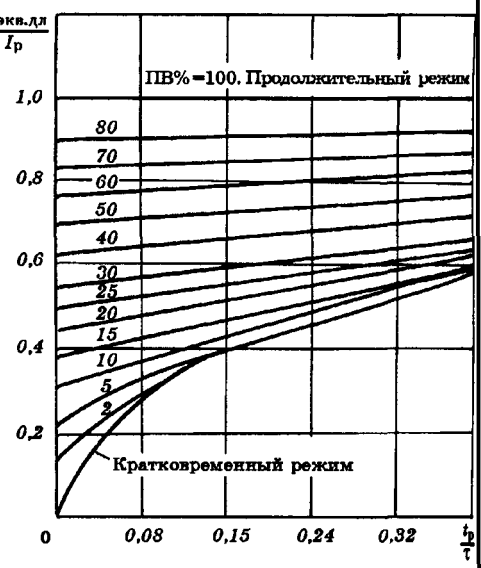


Рис. 23.5. Кривые $I_{экв.дл}/I_p = f\left(t_p/\tau\right)$ для резисторов при различных ПВ %

Предложенный пусковой реостат для заданного режима работы не подходит по току, поэтому рекомендуется использовать пусковой реостат серии РЗП-3 на номинальный ток 125 А и потребляемую мощность 0,6 кВт.

23.2. СИЛОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Силовые конденсаторы применяются в силовых сетях высокого и низкого напряжения или в силовых устройствах повышенных частот. Они могут применяться как отдельными единицами, так и в виде комплектных конденсаторных установок или мощных батарей с параллельно-последовательным соединением отдельных единиц. В отличие от конденсаторов, применяемых в радиоэлектронике, силовые конденсаторы, за исключением нескольких его типов, имеют значительную массу и объем, а также большие емкость, реактивную мощность и запасаемую энергию в конденсаторной единице.

Силовые конденсаторы обычно классифицируются в соответствии с областями их применения, режимами работы и конструктивными особенностями по следующим основным группам:

а) конденсаторы для электроустановок переменного тока промышленной частоты (косинусные и др.);

б) конденсаторы для электроустановок переменного тока повышенной частоты от 500 до 1000 Гц (электротермические устаиовки и др.);

в) конденсаторы связи и отбора мощности;

г) конденсаторы, работающие иа постоянном токе с наложением переменной составляющей или без нее (фильтровые и др.);

д) конденсаторы, работающие в режиме заряд-разряд (импульсиые).

КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

К данной группе конденсаторов относятся в первую очередь конденсаторы для повышеиия коэффициента мощности электроустановок переменного тока частотой 50 Гц (косинусные), выпускаемые согласно ГОСТ 1282-88. В соответствии с этим ГОСТ конденсаторы выпускаются для внутренних и наружных установок на длительную работу при температуре окружающего воздуха не более 50 °С. На номинальные напряжения 1,05; 3,15; 6,3; 10,5 кВ конденсаторы изготавливаются в однофазном исполнении, на номинальные напряжения 0,22; 0,38; 0,5 и 0,66 кВ — как в однофазном, так и в трехфазном исполнении. Конденсаторы однофазного исполнения изготавливаются как с двумя изолированными выводами, так и с выводами, один из которых соединен с корпусом. В трехфазных конденсаторах секции в пакете делят на три группы (фазы) и соединяют по схеме треугольника. В конденсаторах на номинальное напряжение 1,05 кВ и ниже все секции соединены параллельно и каждая снабжена встроенным внутри плавким предохранителем, который отключает секцию при ее пробое. В конденсаторах на номинальные напряжения 3,15; 6,3 и 10,5 кВ соединение секций в пакетах конденсаторов — смешанное.

Конструктивное исполнение косинусных конденсаторов обозначается цифрами: 1 — однофазное исполнение с одним изолированным выводом; 2 — однофазное исполнение с двумя изолированными выводами и 3 — трехфазное исполнение.

В настоящее время широкое распространение получили *конденсаторы серии КЭ и КЭК* (рис. 23.6). Конденсаторы изготавливаются в однофазном и трехфазном исполнении на напряжения ниже 1,05 кВ; в однофазном исполнении на напряжения 1,05 кВ и выше; конструктивного исполнения 1, 2, 3. Конденсаторы в трехфазиом исполнении имеют соединеиия по схеме треугольника. Конденсаторы устанавливаются в конденсаторных установках и батареях или на специальном металлическом каркасе в вертикальном положении, выводами вверх, в одии, два и три яруса при одно- и двухрядном расположении их в ярусе.

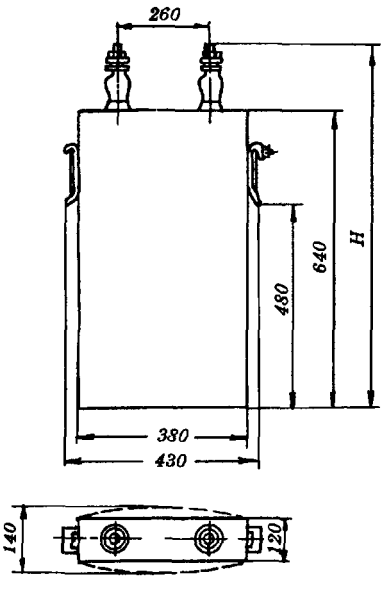


Рис. 23.6. Косинусный конденсатор типа КЭ
H — высота конденсатора в зависимости от типоисполнения

Конденсаторы типа КЭП-6,3 и КЭП-10,5 имеют аналогичную конструкцию, как и конденсаторы типа КЭ и КЭК. Отличие — использование в качестве диэлектрика чистопленочной основы.

Конденсаторы КСК1 и КСК2 состоят из одного или двух пакетов, каждый из которых собирается из параллельно соединенных секций. В качестве диэлектрика используется высококачественная тонкая полипропиленовая пленка и конденсаторная бумага повышенной прочности, что и позволяет повысить удельиые характеристики и снизить активные потери в 1,5 раза по сравнению с конусными конденсаторами типа КС1 (КС2) с бумажным диэлектриком [23.13].

Корпус *конденсаторов типа КМПС* выполиен из цельнотянутого алюминия. Выводы выполнены в виде лепестка, в котором имеются шпильки, служащие для подключеиия. Пакет собран из трех цилиндрических секций, соединенных по схеме треугольника. В верхней части корпуса имеется устройство, предназначенное совместно с прерывателем для отключения конденсаторов от электрической цепи при повышении давления в конденсаторе, которое может возникнуть в конце срока службы за счет газов, выделяющихся при местных пробоях диэлектрика.

Конденсаторы типа КЭКФ и КЭКШ предназначены для силовых фильтров высших гармоник, в том числе работающих в составе статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности, а также шунтовых батарей линий электропередачи постоянного тока, для компенсации блоков конденсаторов и конденсаторных установок с целью повышения коэффициента мощности.

Конденсаторы однофазного исполнения типа КСКФ выполнены с комбинированным диэлектриком, пропитанным синтетической жидкостью.

Технические характеристики вышеприведенных конденсаторов даиы в табл. 23.12.

На базе косинусных конденсаторов изготавливаются конденсаторные установки (КУ), которые предназначены для автоматической компенсации реактивной мощности нагрузок потребителей в сетях общего назначения напряжеиием 0,38 кВ и частоты 50 Гц (табл. 23.13).

КУ представляют собой ячейки, в которых размещены аппаратура управления, измерения и сигнализации и конденсаторы, соединенные по схеме треугольника.

Автоматическое отключение конденсаторов при перегрузке по току за счет повышения напряжения и внешних гармоник в установках обеспечивает электротоковое реле. Защита от токов короткого

Таблица 23.12. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Мощность, квар	Номинальная емкость, мкФ	Высота конденсатора, мм	Масса, кг, не более	ТУ
КЭ1-0,38-25-2У3	0,38	25	551,0	410	26	ТУ 16-673.041-85
КЭ1-0,38-25-3У3	0,38	25	551,0	410	26	
КЭ2-0,38-40-2У3	0,38	40	882,0	480	53	
КЭ2-0,38-40-3У3	0,38	40	882,0	480	53	
КЭ2-0,38-50-2У3	0,38	50	1102,0	480	53	
КЭ2-0,38-50-3У3	0,38	50	1102,0	480	53	
КЭК1-0,4-$33^{1/3}$-2У3	0,4	$33^{1/3}$	663,0	410	25	
КЭК1-0,4-$33^{1/3}$-3У3	0,4	$33^{1/3}$	663,0	404	25	
КЭК2-0,4-67-2У3	0,4	67	1334,0	725	50	
КЭК2-0,4-67-3У3	0,4	67	1334,0	725	50	
КЭ1-0,66-25-2У3	0,66	25	183,0	418	26	
КЭ1-0,66-25-3У3	0,66	25	183,0	418	26	
КЭ2-0,66-50-2У3	0,66	50	366,0	480	53	
КЭ2-0,66-50-3У3	0,66	50	366,0	480	53	
КСК1-0,4-$33^{1/3}$-3Т3	0,4	$33^{1/3}$	522,8	404	30	ТУ 16-88ИБДМ. 673320.004ТУ
КСК1-0,415-$33^{1/3}$-3Т3	0,415	$33^{1/3}$	616,3; 513,6	404	30	
КСК1-0,44-$33^{1/3}$-3Т3	0,44	$33^{1/3}$	456,9	404	30	
КСК2-0,4-67-3У3	0,4	67	1111; 1334	725	60	
КСК2-0,415-67-3Т3	0,415	67	1239; 1032	725	60	
КСК2-0,44-67-3Т3	0,44	67	919	725	60	
КЭП-6,3-200-2У1	6,3	200	16,0	821	48	
КЭП-6,3-225-2У1	6,3	225	18,0	821	48	
КЭП-10,5-200-2У1	10,5	200	5,7	861	48	
КЭП-10,5-225-2У1	10,5	225	6,4	861	48	
КМПС-0,4-12,5-3У3	0,4	12,5	82,9×3	271	3,9	ТУ 16-673.006-83
КЭКФ-4-200-2УХЛ1	4,0	200,0	39,8	827	50	ТУ 16-87 ИБДМ.673320.003 ТУ
КЭКФ-4,4-200-2УХЛ	4,4	200,0	32,9	827	50	
КЭКШ-6,3-200-1У1	6,3	200,0	16,0	861	50	
КЭКФ-6,3-200-2УХЛ1	6,3	200,0	16,0	861	50	
КЭКФ-6,6-200-2УХЛ1	6,6	200,0	14,6	861	50	
КЭКШ-7,3-200-1У1	7,3	200,0	12,0	861	50	
КЭКФ-7,3-200-2УХЛ1	7,3	200,0	12,0	861	50	
КСКФ-4,4-150-2У1	4,4	150,0	24,7	787	52	ТУ 16-87ИБДМ. 673323.002ТУ
КСКФ-6,6-150-2У1	6,6	150,0	11,0	821	52	
КСКФ-7,3-150-2У1	7,3	150,0	9,0	821	52	
КЭ1-1,05-37,5-1У3	1,05	37,5	108,3	418	26	ТУ 16-673.041-85
КЭ1-1,05-37,5-2У3	1,05	37,5	108,3	418	26	
КЭ2-1,05-75-1У3	1,05	75,0	217,0	739	52	
КЭ2-1,05-75-2У3	1,05	75,0	217,0	739	52	
КЭ1-3,15-37,5-2У3	3,15	37,5	12,0	441	25	
КЭ1-6,3-37,5-2У3	6,3	37,5	3,0	471	25	
КЭ1-10,5-37,5-2У3	10,5	37,5	1,08	526	25	
КЭ2-3,15-75-2У3	3,15	75,0	24,0	756	48	
КЭ2-6,3-75-2У3	6,3	75,0	6,0	786	48	
КЭ2-10,5-75-2У3	10,5	75,0	2,16	841	48	

Таблица 23.13. Конденсаторные установки

Тип	Номинальная мощность, квар	Номинальное напряжение, кВ	Количество ступеней	Габаритные размеры, мм			Масса, кг	ТУ
				Основание		высота		
				длина	ширина			
УКМ58-0,4-100-33$^{1/3}$У3	100	0,4	3	530	440	1675	175	ТУ16-673.083-86
УКМ58-0,4-200-33$^{1/3}$У3	200	0,4	6	720	440	1675	285	
УКМ58-0,4-268-67У3	268	0,4	4	730	440	1910	335	
УКМ58-0,4-402-67У3	402	0,4	6	1120	440	1910	505	
УКМ58-0,4-536-67У3	536	0,4	8	1430	440	1910	635	
УК1-0,4-37,5У3	37,5	0,4	1	415	150	360	14,52	ТУ16-89 ИБДМ.673521. 602ТУ
УК2-0,4-37,5У3	37,5	0,4	2	415	150	360	14,52	
УКМ-0,4-112,5-37,5У3	112,5	0,4	3	540	410	1860	130	ТУ16-673.065-87
УКМ-0,4-225-37,5У3	225	0,4	6	740	410	1860	180	
УКМ-0,4-337,5-37,5У3	337,5	0,4	9	1070	410	1860	270	
УК1-0,4-33$^{1/3}$У3	331/3	0,4	1	430	130	450	28	ТУ16-673.058-86
УК2-0,4-66$^{2/3}$У3	662/3	0,4	2	430	325	500	59	
УК3-0,4-100У3	100	0,4	3	430	530	500	87	
УК4-0,4-133$^{1/3}$У3	1331/3	0,4	4	430	735	500	115	
УКЛ56-6,3-450У3	450	6,3	1	2210	820	1600	570	ТУ16-673.075-86
УКЛ56-6,3-900У3	900	6,3	2	3010	820	1600	825	
УКЛ56-6,3-1350У3	1350	6,3	3	3810	820	1600	1080	
УКЛ56-6,3-1800У3	1800	6,3	4	4610	820	1600	1335	
УКЛ56-6,3-2250У3	2250	6,3	5	5410	820	1600	1590	
УКЛ56-6,3-2700У3	2700	6,3	6	6210	820	1600	1845	
УКЛ56-6,3-3150У3	3150	6,3	7	7010	820	1600	2100	
УКЛ56-10,5-450У3	450	10,5	1	2210	820	1600	570	
УКЛ56-10,5-900У3	900	10,5	2	3010	820	1600	825	
УКЛ56-10,5-1350У3	1350	10,5	3	3810	820	1600	1080	
УКЛ56-10,5-1800У3	1800	10,5	4	4610	820	1600	1335	
УКЛ56-10,5-2250У3	2250	10,5	5	5410	820	1600	1590	
УКЛ56-10,5-2700У3	2700	10,5	6	6210	820	1600	1845	
УКЛ56-10,5-3150У3	3150	10,5	7	7010	820	1600	2100	
БКЭ-1,05-252У1	252	1,05	4	900	530	575	143	ТУ16-673.082-86
БКФЭ-12,6-800У1	800	12,6	16	1670	1490	1070	640	ТУ16-88 ИБДМ.673840.611 ТУ
БКФЭ-12,6-1000У1	1000	12,6	20	1950	1490	1070	750	
БКШЭ-126-2200У1	2200	12,6	22	1800	1490	1350	1530	

замыкания осуществляется плавкими предохранителями. Для включения и отключения ступеней в установках применены магнитные пускатели. Установки оснащены регулятором и могут работать в режиме автоматического и ручного управления. Имеются индикаторы, указывающие состояние установки в процессе ее эксплуатации.

КОНДЕНСАТОРЫ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

К данной группе конденсаторов в первую очередь относятся конденсаторы для повышения cosφ электротермических установок на частоты 0,5—10 кГц с водяным охлаждением (по ГОСТ 18689-81Е). Основное место среди них занимают *конденсаторы типа ЭСВ* (рис. 23.7), например ЭСВ-0,8-0,5-2У3 — конденсатор для электротермических установок, с пропиткой синтетической жидкостью и с водяным охлаждением на напряжение 0,8 кВ, частоты 0,5 кГц, с двумя выводами, климатическое исполнение У, категории размещения 3.

Пакет конденсатора собирается из отдельных секций, соединенных между собой параллельно. С одной стороны пакета к обкладкам припаивается охлаждающий змеевик из медной трубки диаметром 10/7 мм (числитель — наружный диаметр, знаменатель — внутренний), по которому во время работы конденсатора пропускается охлаждающая вода. Концы охлаждающего змеевика выступают над крышкой корпуса и припаиваются к общему выводу. Охлаждающий змеевик используется в качестве токоподвода. Другие обкладки секций с противоположной стороны пакета изоли-

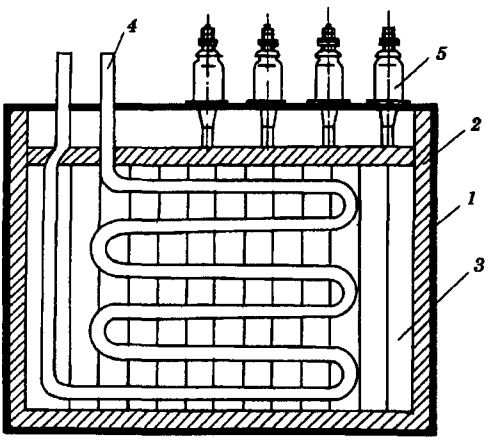


Рис. 23.7. Конструкция конденсатора серии ЭСВ
1 — корпус; *2* — изоляция пакета от корпуса; *3* — секция; *4* — охлаждающая трубка; *5* — проходной изолятор

рованы от корпуса и подсоединены к токоподводам. Параллельно соединенные секции образуют ступени с самостоятельными выводами через фарфоровые изоляторы на крышку корпуса.

Конденсаторы ЭСВ имеют две или четыре ступени емкости. Пакеты помещены в сварной корпус прямоугольной формы, выполненный из стали для конденсаторов, работающих при частоте до 1 кГц, и из латуни или немагнитной стали для конденсаторов, работающих при частоте выше 1 кГц.

Основные технические параметры конденсаторов типа ЭСВ приведены в табл. 23.14.

Конденсаторы типа ЭСВК (с пропиткой синтетической жидкостью) и *ЭЭВК* (с пропиткой экологически безопасной жидкостью) также предназначены для повышения коэффициента мощности электротермических установок.

Конденсаторы типа ЭСВ, ЭСВП, ЭЭВ и ЭЭВП имеют одинаковое конструктивное исполнение.

Конденсаторы типа КЭЭК предназначены для работы в батареях индукционных цепей (ТУ 16-87 ИБДМ.673313.019ТУ).

КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ЕМКОСТНОЙ СВЯЗИ, ОТБОРА МОЩНОСТИ И ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Конденсаторы в фарфоровых корпусах с диэлектриком из конденсаторной бумаги, пропитанной минеральным маслом, классов напряжеиия от 36 до 500 кВ включительно согласно ГОСТ 15581-80Е предназначены для обеспечения емкостной связи по ЛЭП переменного тока частотой 50 Гц, для телемеханики и защиты на частотах от 36 до 750 кГц. Конденсаторы класса напряжения 500 кВ предназначены также для измерения напряжения и для отбора мощности с целью обеспечения электроэнергией переключающих пунктов, расположенных вдоль ЛЭП высокого напряжения.

Основными конструктивными элементами конденсаторов являются: фарфоровая покрышка; крышки (верхняя, нижняя), которые являются электрическими выводами; кольца уплотнительные, обеспечивающие герметичность конденсаторов; пакет, пропитанный конденсаторным маслом; расширители (рис. 23.8).

Конденсаторы типов СМ, СМИЗ, СМВ, СМБВ, СМЗВ, СМБ устанавливаются в колонку на изолирующую подставку и соединяются последовательно. Количество конденсаторов в колонке зависит от номинального напряжения ЛЭП.

Технические данные конденсаторов для емкостей связи приведены в табл. 23.15.

Конденсаторы связи СММ-20/$\sqrt{3}$-35У1 и СММ-20/$\sqrt{3}$-107У1 выполнены в металлическом корпусе и крепятся в обойме, установленной на изоляционной конструкции, соответствующей классу напряжения линии.

Выпускаются также батареи конденсаторов связи типа БС, БСБ и БСО, которые выполняются в соответствии с ТУ 16-521.283-82 и применяются в цепях с напряжением от 150/$\sqrt{3}$ до 500/$\sqrt{3}$ кВ Номинальная емкость меняется в пределах от 1,47 до 7,00 нФ.

Конденсатор связи типа СМБ-20-17,5ТВ1 предназначен для подключения высокочастотной аппаратуры связи и релейной защиты к грозозащитным тросам высоковольтных линий 220—500 кВ, а

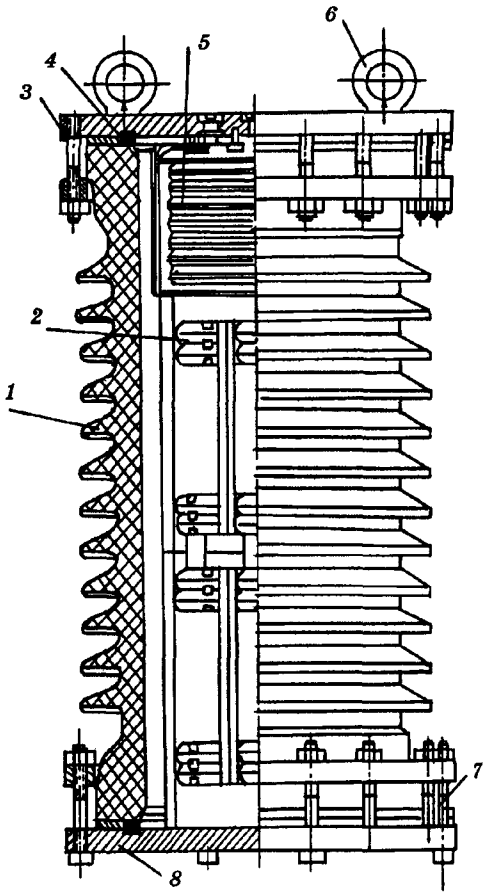


Рис. 23.8. Конденсатор связи типа СМ
1 — фарфоровая покрышка; *2* — выемная часть; *3* — верхняя крышка; *4* — уплотняющее кольцо; *5* — расширитель; *6* — грузовой винт; *7* — контактный болт; *8* — нижняя крышка

Таблица 23.14. Конденсаторы для электротермических установок

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Частота, кГц	Номинальная мощность, квар	Номинальная емкость, мкФ	ТУ
ЭСВК-0,8-0,5У3	0,8	0,5	300	149,30	ТУ 16-527 263-80
ЭСВК-1-0,5У3	1,0			95,50	
ЭСВК-1,6-0,5У3	1,6			37,30	
ЭСВК-2-0,5У3	2,0			23,90	
ЭСВК-0,8-1У3	0,8	1,0	550	112,00	
ЭСВК-1-1У3	1,0			71,70	
ЭСВК-1,6-1У3	1,6			28,00	
ЭСВК-2-1У3	2,0			17,90	
ЭСВК-0,5-2,4У3	0,5	2,4		146,00	
ЭСВК-0,8-2,4У3	0,8			57,00	
ЭСВК-1-2,4У3	1,0			36,50	
ЭСВК-1,6-2,4У3	1,6			14,25	
ЭСВК-2-2,4У3	2,0			9,10	
ЭСВК-0,5-4У3	0,5	4,0		87,58	
ЭСВК-0,8-4У3	0,8			34,21	
ЭСВК-1-4У3	1,0			21,89	
ЭСВК-1,64У3	1,6			8,55	
ЭСВК-2-4У3	2,0			5,47	
ЭСВК-0,5-10У3	0,5	10,0	650	41,40	ТУ 16-527 263-80
ЭСВК-0,8-10У3	0,8			16,17	
ЭСВ-0,8-0,5-2У3	0,8	0,5	200	99,50	ТУ 16-527 177-82
ЭСВ-1-0,5-2У3	1,0	0,5	200	63,60	
ЭСВ-1,6-0,5-2У3	1,6	0,5	200	24,90	
ЭСВ-2-0,5-2У3	2,0	0,5	200	15,91	
ЭСВ-0,8-1-2У3	0,8	1,0	250	61,20	
ЭСВ-1-1-2У3	1,0	1,0	250	39,80	
ЭСВ-1,6-1-2У3	1,6	1,0	250	15,55	
ЭСВ-2-1-2У3	2,0	1,0	250	9,95	
ЭСВ-0,8-2,4-2У3	0,8	2,4	300	31,20	
ЭСВ-1-2,4-2У3	1,0	2,4	300	19,90	
ЭСВ-1,6-2,4-2У3	1,6	2,4	300	7,80	
ЭСВ-2-2,4-2У3	2,0	2,4	300	4,97	
ЭСВ-0,8-4-2У3	0,8	4,0	350	21,80	
ЭСВ-1-4-2У3	1,0	4,0	350	13,90	
ЭСВ-2-2-2У3	2,0	10,0	350	3,48	
ЭСВ-0,8-10-2У3	0,8	10,0	400	9,96	
ЭСВП-0,8-10У3	0,8	10,0	400	9,96	
ЭЭВ-0,8-0,5-2У3	0,8	0,5	200	99,50	
ЭЭВ-1-0,5-2У3	1,0	0,5	200	63,60	ТУ 16-527.177-82
ЭЭВ-1,6-0,5-2У3	1,6	0,5	200	24,90	
ЭЭВ-2-0,5-2У3	2,0	0,5	200	15,91	
ЭЭВ-0,8-1-2У3	0,8	0,5	200	62,20	
ЭЭВ-1-1-2У3	1,0	0,5	200	39,80	
ЭЭВ-1,6-1-2У3	1,6	1,0	250	15,55	
ЭЭВ-2-1-2У3	2,0	1,0	250	9,95	
ЭЭВ-0,8-2,4-2У3	0,8	2,4	300	31,20	
ЭЭВ-1-2,4-2У3	1,0	2,4	300	19,90	
ЭЭВ-1,6-2,4-2У3	1,6	4,0	300	7,80	
ЭЭВ-2-2,4-2У3	2,0	4,0	300	4,97	
ЭЭВ-0,8-4-2У3	0,8	4,0	350	21,80	
ЭЭВ-1-4-2У3	1,0	4,0	350	13,90	
ЭЭВ-1,6-4-2У3	1,6	4,0	350	5,45	
ЭЭВ-2-4-2У3	2,0	4,0	350	3,48	
ЭЭВ-0,8-10-2У3	0,8	10,0	400	9,96	
ЭЭВП-0,8-10У3	0,8	10,0	400	9,96	

Таблица 23.15. Конденсаторы связи

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, нФ	Габаритные размеры, мм		Масса, кг	ТУ
			диаметр	высота		
СМ-66/$\sqrt{3}$ - 4,4У1	66/$\sqrt{3}$	4,4	280	890	68	ГОСТ 15581-80
СМ-110/$\sqrt{3}$ - 6,4У1	110/ $\sqrt{3}$	6,4	330	1170	140	
СМ-133/$\sqrt{3}$ - 18,6У1	133/ $\sqrt{3}$	18,6	730	1375	765	
СМ-166/$\sqrt{3}$ - 14У1	166/ $\sqrt{3}$	14,0	730	1375	765	
ОМ-15-107У1	15	107,0	730	450	345	
СММ-20/$\sqrt{3}$ - 35У1	20/$\sqrt{3}$	35,0	—	406	13	ТУ 16-527.128-79
СММ-20/$\sqrt{3}$ - 107У1	20/ $\sqrt{3}$	107,0	—	664	25	
СМБ-20-17,5ТВ1	20	17,5	280	890	75	ТУ 16-521.284-82
СМК-115-80У1	115	80	730	1576	850	ТУ 16-673.022-85
СМКВ-115-80У1	115	80	730	1621	850	
СМИ-166/$\sqrt{3}$ - 14У1	166/ $\sqrt{3}$	14	730	1375	750	ТУ 16-521.247-78
СОМИ-166/$\sqrt{3}$+15 - - 4+107У1	166/ $\sqrt{3}$	14; 107	730	2175	1100	ТУ 16-521.247-78
СМИ-188/$\sqrt{3}$ - 12У1	188/ $\sqrt{3}$	12; 105	730	1375	750	ТУ 16-521.249-78
СОМИ-188/ $\sqrt{3}$+15- - 12+105У1	188/ $\sqrt{3}$	12	730	2175	1100	

также к фазным приводам высоковольтных линий 6—35 кВ. Пропитка конденсатора выполнена трансформаторным маслом.

В табл. 23.15 приведены также сведения *о конденсаторах связи типа СМК, СМКВ, СМИ, СОМИ.*

Конденсаторы связи типа СМК, СМКВ и *ОМК* на 110/$\sqrt{3}$, 133/$\sqrt{3}$ и 166/$\sqrt{3}$ кВ выполнены с комбинированным диэлектриком и имеют изолирующие подставки типа ПИ5 и ПИ6. Конденсаторы выполнены согласно ТУ 16-88 ИБДМ. 673400.001ТУ.

Конденсаторы для делителей напряжения по конструкции аналогичны конденсаторам связи. К данной группе конденсаторов относятся *конденсаторы серии ДМ, ДМРУ, ДМП, ДМК и ДМЭ.* Они предназначены для комплектования измерительных трансформаторов напряжения емкостного типа.

Конденсаторы типа ДМК предназначены для делителей напряжения, которые используются в различных аппаратах на ЛЭП высокого напряжения переменного тока, в том числе для воздушных выключателей.

Конденсаторы типа ДМЭ предназначены для деления напряжения по разрывам дугогасительных камер высоковольтного выключателя комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией для ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения. Корпус конденсатора выполнен из лавсаноэпоксидного цилиндра. Крышка изготовлена из алюминиевого сплава.

Конденсаторы рассчитаны на напряжения 150 и 180 кВ, имеют емкость 0,28; 0,56; 0,75 или 0,90 нФ. Масса конденсатора — 14,6 кг. Изготовляется согласно ТУ 16-673.0,78-86.

В табл. 23.16 приведены данные по конденсаторам типов ДН, ДМК, ДМРУ и ДМП.

ФИЛЬТРОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсатор ФЭТ-4-16У2 предназначен для работы в контурах высокочастотных фильтров тяговых подстанций под навесом или в помещении

Таблица 23.16. Конденсаторы делителей напряжения

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, нФ	Масса, кг	ТУ
ДМК-190-1,6УХЛ1	190	1,6	230	ТУ 16-673.003-83
ДМК-190-1,4УХЛ1	190	1,4	230	
ДМК-190-1,1УХЛ1	190	1,1	220	
ДМ-80-0,002У1	80	2,0	100	ТУ 16-521 093-79
ДМРУ55-3,3У1	55	3,3	70	ТУ 16-521.067-76
ДМРУ60-2,2У1	60	2,2	70	
ДМРУ60-2,6У1	60	2,6	70	
ДМРУ80-1,0У1	80	1,0	70	
ДМ-80-2,1-2У1	80	2,1	275	ТУ 16-521 258-79
ДМП-80-2,1-2У1	80	2,1	305	
ДМК-80-4,4Х1	80	4,4	70	ТУ 16-673.077-86

Таблица 23.17. **Фильтровые конденсаторы**

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, мкФ	Габаритные размеры, мм			Масса, кг, не более	ТУ
			Основание		высота		
			длина	ширина			
ФЭТ-4-16У2	4	16	380	120	413	26	ТУ 16-521.272-81
ПСП-11-5У3	11	5	380	120	537	25	ТУ 16-87ИБДМ.673220.001
ФСК-6-140У3	6	140	380	120	468	25	
ФК-20-15	200	15	455	150	352	33	ТУ 16-521.145-80
ПЭК-4,5-5УХЛ4	4,5	5	380	120	496	30	ТУ 16-527.265-80
ПСК-1,6-100У2	1,6	100	380	120	466	30	ТУ 16-673.012-84
ФС-1-600-У2	1	600	380	120	429	30	
ПСК-0,7-20У2	0,7	20	172	110	250	6	ТУ 16-527.245-77
ПСК-0,7-30У2	0,7	30	172	110	250	6	
ПСК-0,7-90У2	0,7	90	380	120	260	16	
ФЭК-5-25У2	5	25	380	120	413	24	ТУ 16-88ИБДМ.673223.011. ТУ

Конденсатор работает при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения частотой от 100 до 1600 Гц, при этом значения напряжения переменного тока не должны превышать соответственно 0,92 кВ.

Конденсаторы типов ПСП-11-5У3 и ФСК-6-14У3 предназначены для работы в тиристорных импульсных преобразователях постоянного тока.

Конденсатор ФК-200-15 используется для сглаживания пульсаций переменной составляющей тока в высоковольтных выпрямительных устройствах и для работы в схемах удвоения напряжения в среде трансформаторного масла.

Конденсатор типа ФЭК-5-25У2 предназначен для работы в контурах высокочастотных фильтров тяговых подстанций.

Технические характеристики фильтровых конденсаторов приведены в табл. 23.17.

ИМПУЛЬСНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Импульсные конденсаторы широко используются в установках для высоковольтных импульсных подстанций, в электротехнологических установках (магнитная штамповка, дробление пород, сейсмическая разведка и др.). Емкостные накопители энергии на основе импульсных конденсаторов применяются в электрофизических установках: для получения и исследования высокотемпературной плазмы, для создания сверхсильных импульсных токов и т. д. Импульсные конденсаторы используются для получения мощных нмпульсных источников света, в медицнне, в лазерной и локационной технике.

Импульсные конденсаторы работают в режиме медленный заряд — быстрый разряд, что и определяет электрические и конструктивные особенности данной группы конденсаторов.

Основные технические данные отечественных импульсных конденсаторов приведены в табл. 23.18.

Импульсные конденсаторы серии ИМКН-5-140У2 предназначены для работы в различных импульсных установках в режнме неполного разряда. Время разряда конденсатора (глубина разряда не более 0,75 кВ) составляет не менее 0,1 с. Частота следования циклов заряд-разряд не более 50 в мин.

Конденсаторы типа ИК предназначены для получения больших импульсных токов. Апериодический заряд до номинального напряжения происходит за время не более 2 мин. Частота следования циклов заряд-разряд составляет не более трех в минуту. Максимальная амплитуда разрядного тока составляет 200 кА.

В схемах питания электрофизических установок применяются *импульсные конденсаторы типа ИК-3-300У3 и ИКМ-50-6УХЛ4*. Последний отличается малой индуктивностью (не более 20 нГн).

Конденсаторы типа ИКI предназначены для получения больших импульсов тока и рассчитаны на повышенное номинальное напряжение 100 кВ. Конденсатор работает в режиме апериодического заряда до номинального напряжения и колебательного разряда с декрементом не менее 1,5. Максимальная частота следования циклов заряд-разряд не более 4 в мин.

Конденсаторы типа ИК-50-1,35УХЛ4 работают в установках электрогидравлического эффекта, а также в других импульсных схемах.

Конденсатор ИМ-4-13У3 предназначен для работы в формирующих линиях импульсных устройств и других импульсных установках. Конденсатор работает в режиме апериодического заряда до номинального напряжения и однополярного разряда от номинального напряжения током синусоидальной формы за время не менее 10 мкс. Частота следования циклов заряд-разряд составляет не более 25 Гц при заряде до номинального напряжения.

Кроме импульсных конденсаторов выпускаются генераторы импульсных напряжений (ГИН) и токов (ГИТ).

Генератор импульсных токов ГИТ-50 предназначен для электрогидравлических и других установок, использующих электрический разряд в технологических целях (ТУ 16-435.138-86). Генератор имеет исполнения на питающие напряжения

Таблица 23.18. Импульсные конденсаторы

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная емкость, мкФ	Собственная индуктивность, нГн	Тангенс угла потерь при 50 Гц, не более	Масса, кг	ТУ
ИМКН-5-140У2	5	140	—	$4 \cdot 10^{-3}$	48	ТУ 16-521.291-83
ИК-25-13,2УХЛ4	25	13,2	35	$1 \cdot 10^{-2}$	108	ТУ 16-87ИБДМ.673300.001ТУ
ИК-30-9,2УХЛ4	30	9,2	35		108	
ИК-50-3,3УХЛ4	50	3,3	35		108	
ИК-60-2,3УХЛ4	60	2,3	35		108	
ИК-5-200У2	5	200	600	$6 \cdot 10^{-3}$	48	ТУ 16-87ИБДМ.673322.008ТУ
ИК1-6-150УХЛ4	6	150	60	$6 \cdot 10^{-3}$	48	ТУ 16-87ИБДМ.673322.009ТУ
ИК-8-85УХЛ4	8	85	60		48	
ИК1-10-50УХЛ4	10	50	60		48	
ИК-100-0,6УХЛ4	100	0,6	150	$6 \cdot 10^{-3}$	29	ТУ 16-88ИБДМ.673232.006ТУ
ИК-3-300У3	3	300	—	$6 \cdot 10^{-3}$	50	ТУ 16-521.189-75
ИК1-100-0,25УХЛ4	100	0,25	140	$6 \cdot 10^{-3}$	29	ТУ 16-88ИБДМ.673232.008ТУ
ИК1-100-0,4УХЛ4	100	0,4	140		29	
ИКМ-50-6 УХЛ4	50	6	20	$1 \cdot 10^{-2}$	110	ТУ 16-88ИБДМ.673332.006ТУ
ИКМ-50-6УХЛ4	50	1,35	550	$1 \cdot 10^{-2}$	101	ТУ 16-88ИБДМ.673334.004ТУ
ИК-50-1,35УХЛ4	4	13	—	$3,5 \cdot 10^{-3}$	25	ТУ 16-89ИБДМ.673222.004ТУ
ИМ-4-13У3	25	30	35	$1 \cdot 10^{-2}$	108	ТУ 16-89ИБДМ.673322.011ТУ
ИК-25-30УХЛ4	25	30	35	$1 \cdot 10^{-2}$	108	ТУ 16-89ИБДМ.673322.011ТУ
ИКМ1-50-9УХЛ4	50	9	60	$1 \cdot 10^{-2}$	55	ТУ 16-89ИБДМ.673000.007ТУ
ИКМ1-50-12УХЛ4	50	12	60		55	
ИКМ2-50-12УХЛ4	50	12	20		110	

380, 400, 415, 440 В. Номинальное выходное напряжение 50 кВ, полная мощность 18 кВ·А, коэффициент мощности 0,73, коэффициент полезного действия 80%. Генератор состоит из унифицированных блоков зарядного и высоковольтного. Зарядный блок включает в себя выпрямитель-трансформатор и шкаф с индуктивно-емкостным преобразователем. Высоковольтный блок представляет собой металлический шкаф, в котором размещены высоковольтные конденсаторы, защитное устройство, разрядник. Габаритные размеры ГИТ-50 1542×1736×1800 мм. Масса не превышает 2300 кг.

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТЫ КОНДЕНСАТОРОВ И КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Как правило, силовые конденсаторы снабжены встроенной индивидуальной защитой, выполненной в виде плавких предохранителей.

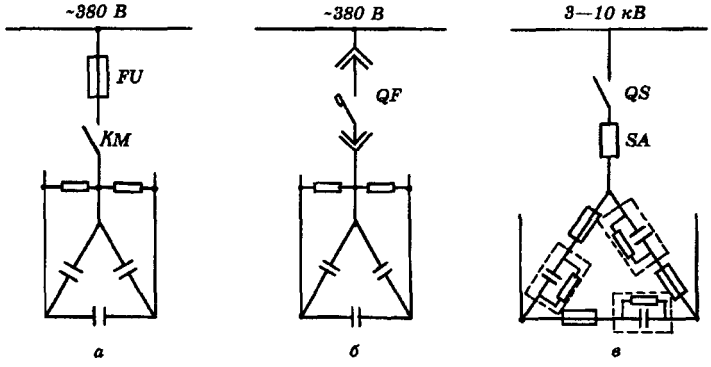


Рис. 23.9. Схемы соединения КУ

а — с предохранителем и контактором; *б* — с автоматическим выключателем; *в* — с выключателем, разъединителем и со встроенными разрядными резисторами

Конденсаторные установки (КУ) на 380 В в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) должны иметь защиту от токов КЗ с наименьшим временем отключения, которая обеспечивала бы требуемую селективность работы [23.12]. Если конденсаторы, комплектующие КУ имеют встроенные индивидуальные предохранители, то общая защита КУ может быть осуществлена с помощью предохранителей *FU* с рубильником или контактором *KM* (см. рис. 23.9, *а*) или с помощью автоматического выключателя *QF* (см. рис. 23.9, *б*) или с помощью разъединителя *QS* и выключателя *SA* (рис. 23.9, *в*).

В этом случае плавкая вставка предохранителя для общей защиты КУ выбирается по току

$$I_{вст} \leq 1{,}6 n_{общ} \frac{Q_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_л},$$

где $n_{общ}$ — общее число конденсаторов в КУ, шт.; $Q_{ном}$ — номинальная мощность одного конденсатора, квар; $U_л$ — линейное напряжение сети, кВ.

Автоматический выключатель должен иметь комбинированный расцепитель, обеспечивающий защиту от перегрузки и КЗ. Причем уставка тока максимальной защиты комбинированного расцепителя с учетом перегрузочной способности конденсаторов не должна превышать 130 % номинального тока КУ.

В качестве выключателей может использоваться быстродействующий автомат или контактор для коммутации чисто емкостной нагрузки на номинальный ток 300 — 800 А, допускающий 20—30 операций в сутки. Выключатели должны выдерживать ударный ток КЗ более 50 кА. В качестве таких аппаратов могут использоваться контакторы типа КТУ-4000 или КТ6043 с предохранителями или автоматические выключатели типа А400 с дистанционным управлением и необходимыми видами защит.

Конденсаторные установки на 3—10 кВ в соответствии с ПУЭ должны иметь защиты (см. рис. 23.9, *в* и [23.17]):

от КЗ, общую для всей КУ, выполненную в виде максимальной токовой защиты с отсечкой;

от КЗ в самих конденсаторах, не снабженных встроенной индивидуальной защитой;

от перегрузки токами высших гармоник, если такая перегрузка возможна;

от повышения напряжения свыше 110% номинального значения.

Для надежного действия максимальной токовой защиты при КЗ необходимо, чтобы расчетный ток КЗ был больше тока срабатывания защиты, учитывая, что согласно техническим данным конденсаторы допускают длительную работу при действующем значении тока, равном 130% номинального.

Во избежание ложного срабатывания общей защиты КУ от КЗ ток уставки максимальной защиты принимают примерно в два раза больше ее номинального тока.

Возможно использование индукционных токовых реле с зависимой выдержкой времени, что позволяет их применять для защиты цепей от перегрузки.

В качестве выключателей для КУ на 3—10 кВ наиболее пригодны вакуумные и элегазовые выключателн. Не исключено использование масляных выключателей типов ВМГ-133, ВПМ-10 и др. с запасом по току не менее 50 % номинального тока КУ, снабженных дополнительными шунтирующими резисторами.

Защита от КЗ в конденсаторах является одной из наиболее ответственных типов защит, что обусловлено быстрым возрастанием энергии дуги, возникающей внутри поврежденного конденсатора до значения, при котором корпус конденсатора может быть разрушен. Защита конденсаторов на 3—10 кВ от токов КЗ осуществляется быстродействующими и токоограничивающими плавкими предохранителями типа ПК.

Предохранители выбираются согласно следующим основным требованиям:

номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать напряжению сети, в которой расположены конденсаторы;

предохранители должны выдерживать значительные колебания нагрузки;

предохранители должны быть рассчитаны на периодические переходные токи в процессе коммутации;

при параллельном соединении конденсаторов предохранители должны выдерживать максимальный разрядный ток, проходящий от неповрежденных конденсаторов к поврежденному;

предохранители должны обладать высоким быстродействием и возможностью селективной работы;

разрывная мощность предохранителей должна быть не менее возникающей на выводах конденсатора мощности КЗ;

при пробое отдельных секций конденсатора, соединенных последовательно, номинальный ток плавкой вставки предохранителя не должен превышать 160 % номинального тока защищаемого им конденсатора, т. е.

$$I_{вст} \leq 1{,}6 \frac{Q_{ном}}{U_{ном}},$$

где $Q_{ном}$ — номинальная мощность однофазного конденсатора, квар; $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети, кВ.

С учетом описанных требований в [27.17] даются рекомендации по выбору плавких вставок предохранителей для индивидуальной защиты однофазных конденсаторов выше 1000 В (табл. 23.19).

Таблица 23.19. Выбор плавких вставок предохранителей для индивидуальной защиты однофазных конденсаторов выше 1000 В

Номинальная мощность конденсатора, квар	Номинальный ток $I_{ном}$, А, при номинальном напряжении, кВ					
	10,5		6,3		3,15	
	конденсатора	плавкой вставки	конденсатора	плавкой вставки	конденсатора	плавкой вставки
13	1,24	2	2,06	3	4,12	7,5
18	1,72	3	2,86	5	5,7	10
25	2,38	5	3,97	7,5	7,94	15
37,5	3,57	5	5,97	10	11,9	20
50	4,76	7,5	7,94	15	15,89	30
75	7,15	10	11,9	20	23,8	40
100	9,52	15	15,9	30	31,7	50

Если конденсатор состоит из n последовательно включенных секций, из которых k секций повреждено, то проходящий через предохранитель ток КЗ

$$I_{кз} = \frac{n}{n-k} I_{ном},$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток конденсатора, А.

При правильном выборе плавкой вставки предохранителя он должен срабатывать до пробоя последней секции конденсатора, и этим будет исключена возможность повреждения бака конденсатора.

Для индивидуальной защиты конденсаторов применяются малогабаритные предохранители, которые крепятся одним концом жестко к главным шинам, а другим — гибким проводом к изолятору конденсатора.

23.3. РЕАКТОРЫ

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Токоограничивающие реакторы служат для ограничения тока короткого замыкания, что дает возможность ограничить номинальный ток отключения лннейных выключателей и обеспечить термическую устойчивость отходящих кабелей. В номинальном режиме ток цепи определяется сопротивлением нагрузки и падение напряжения на реакторе составляет 3 ÷ 10% $U_{ном}$. При коротком замыкании все напряжение приложено к реактору поврежденной линии. Благодаря реактору все неповрежденные линии находятся под напряжением, близком к номинальному (реактор поддерживает напряжение на сборных шинах).

Шунтирующие реакторы широко применяются в сетях сверхвысокого напряжения и включаются между токоведущими элементами и землей. Они предназначены для компенсации зарядной мощности в режиме малых нагрузок.

При номинальной нагрузке линии реактора отключаются.

Фильтровые (сглаживающие) реакторы, входящие в состав резонансных, Г-образных или более сложных LC-фильтров низких частот служат для уменьшения содержания высших гармоник в кривой тока, потребляемого преобразователем от сети переменного тока или отдаваемого преобразователем в сеть. Такие реакторы, входящие в состав Г- или П-образных фильтров, часто могут также служить и как токоограничивающие, и в некоторой степени как помехоподавляющие. К фильтровым относятся реакторы, включаемые в цепь постоянного тока преобразователей с целью его сглаживания.

Для компенсации емкостных токов короткого замыкания на землю используются *заземляющие реакторы* с плавной регулировкой индуктивности.

Коммутирующие реакторы используются в цепях принудительной искусственной коммутации автономных инверторов или других преобразователей с конденсаторной коммутацией.

Реактор — это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для использования его индуктивности в электрической цепи.

Основной характеристикой реактора является его вебер-амперная характеристика — зависимость результирующего потокосцепления от тока. В зависимости от этой характеристики реакторы делятся на реакторы с линейной, ограниченно линейной и нелинейной характеристиками.

Во-первых вебер-амперная характеристика линейна при токах, во много раз превышающих номинальное значение. Во-вторых вебер-амперная характеристика практически линейна в заданном ограниченном диапазоне значенний токов. В-третьих реактор имеет существенно нелинейную вебер-амперную характеристику, необходимую для выполнения его основной функции.

Реакторы могут делиться также по другим признакам: назначению, виду магнитной системы, особенностям обмоток, количеству фаз, возможности изменения индуктивности, виду охлаждения и др. Классификация реакторов в завнсимостн от вида установки, способа включения, назначения и применяемого исполнения, рассмотрены в [23.22].

КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРОВ

Виды конструкций реакторов представлены на рис. 23.10. Реакторы с линейной вебер-амперной характеристикой изображены на рис. 23.10, *а* и *б*.

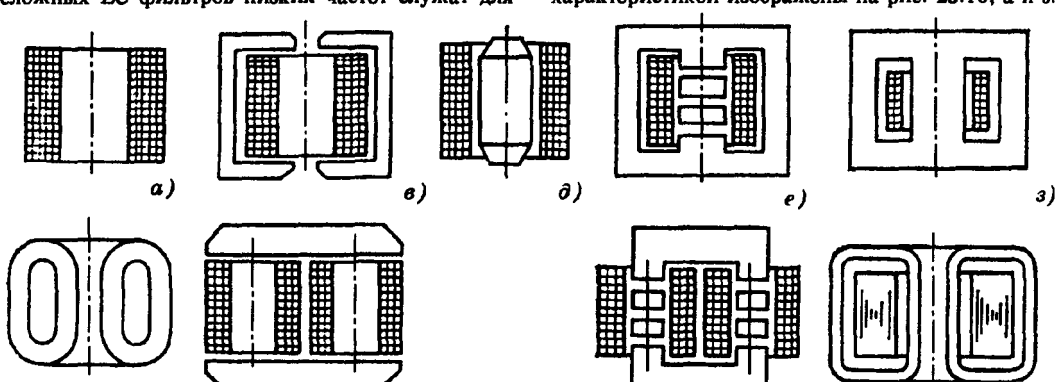


Рис. 23.10. Виды конструкции реакторов (показано только однофазное исполнение, хотя для случаев *в, г, д, з* возможны и трехфазное исполнение)

а, б **— реакторы без стали с цилиндрической обмоткой и тороидальный; *в, г*** **— броневой и ярмовой реакторы, не имеющие стержня; *д*** **— стержневой реактор без ярм; *е,ж*** **— бронестержневой и стержневой реакторы с немагнитными зазорами в стержне; *з, и*** **— бронестержневой и тороидальный насыщающиеся реакторы**

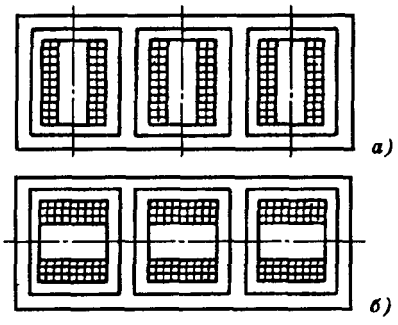


Рис. 23.11. Формы трехфазных магнитных систем реакторов без стержней
а — с параллельными осями, *б* — оси всех трех реакторов совпадают

Эти реакторы обычно не имеют магнитопровода. Индуктивность их неизменна.

На рис. 23.10, *а* представлены реакторы на номинальное напряжение ≥ 20 кВ. Для защиты от воздействия окружающей среды реактор располагается в стальном баке с трансформаторным маслом.

Для уменьшения потерь в баке от магнитного поля реактора применяют специальные магнитные шунты или размагничивающие экраны, что очень усложняет и утяжеляет реактор. На рис. 23.10, *б* представлены тороидальные реакторы [23.20], у которых внешнее магнитное поле практически равно нулю, что позволяет размещать их в стальных кожухах.

На рис 23.10, *в*, *д* даны реакторы в основном с ограниченно-линейной характеристикой. Благодаря наличию в магнитной цепи стали индуктивность возрастает на несколько десятков процентов.

На рис. 23.10, *е*, *ж* изображены реакторы с большой индуктивностью.

Реакторы, показанные на рис. 23.10, *з*, *и* обладают резко нелинейной характеристикой. Их динамическая индуктивность может меняться в сотни илн даже тысячи раз.

Трехфазные реакторы без стержней могут выполняться с магнитной цепью (рис. 23.11).

Расчет и проектирование реакторов рассмотрены в [23.20, 23.25, 23.28].

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ РЕАКТОРОВ

Реакторы на ток $I_{ном} = 25 \div 100$ А при напряжении 3—10 В выполняются в виде дисков в воздухе. Наиболее широкое распространение получили *бетонные реакторы*. Обмотка выполняется многожильным медным или алюминиевым кабелем. Внтки обмотки скрепляются между собой бетонными вертикальными колонками, которые образуются путем заливки бетона в спецнальные формы. Номнальные ток бетонных реакторов $I_{ном} = 150 \div 4000$ А, напряжение $U_{ном}$ до 35 кВ.

В настоящее время бетонные реакторы используются не только в закрытых, но и в открытых распределительных устройствах.

Масляные реакторы выполняются с $I_{ном} = 200 \div 1000$ А; $U_{ном} = 35$ кВ. При $U_{ном} = 35$ кВ три фазы масляного реактора размещаются в одном баке. При $U_{ном} > 35$ кВ каждая фаза размещается в отдельном баке.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОДИНАРНЫХ БЕТОННЫХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Основные обозначения

$x_{ном}\,\%$ — индуктивное сопротивление, %;
$I_{ном}$ — номинальный ток, А;
$U_{ном}$ — номинальное напряжение, кВ;
$x_{ном}$ — индуктивное сопротивление, Ом;
L — индуктивность реактора, Гн;
f — частота сети, Гц;
ω — угловая частота сети, рад/с;
Q — реактивная мощность трехфазного комплекта реакторов, квар;
ΔU — потери напряжения — арифметическая разность напряжений до реактора и после реактора, %
$I_к$ — расчетный ток короткого замыкания, А;
$t_т$ — время термической стойкости, с;
G — масса фазы реактора, кг;
$i_у$ — ударный ток, А.

Испытательные напряжения высоковольтных реакторов даны в ГОСТ 1516-1-78.

Основные соотношения

Индуктивное сопротивление, %

$$x_{ном}\,\% = \frac{I_{ном}\, x_{ном}\, \sqrt{3}}{10 U_{ном}}.$$

Индуктивность, Гн,

$$L = \frac{10\, U_{ном}\, x_{ном}\,\%}{I_{ном}\, 2\,\pi\, f \sqrt{3}}.$$

Реактивная мощность реактора на три фазы, квар,

$$Q = 3\, I_{ном}^2\, x_{ном} \cdot 10^{-3}, \text{ где } x_{ном} = \omega L.$$

Потеря напряжения на реакторе, %,

$$\Delta U = x_{ном}\,\% \sin \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между током и фазным напряжением за реактором.

Расчетный ток короткого замыкания за реактором

$$I_к = \frac{100}{x_{ном}\,\%} I_{ном}.$$

При $x_{ном}\,\% = 3$ % ток $I_к \approx 33{,}3\, I_{ном}$.

Для точного расчета $I_к$ в этом случае необходимо учесть сопротивление цепи до реактора.

При расчетах электродинамических сил принимаем

$$i_у = 1{,}8 \sqrt{2}\, I_к.$$

Основные параметры сдвоенных бетонных токоограничивающих реакторов

Сдвоенный реактор представляет собой единую обмотку со средним выводом, рассчитанным на суммарный ток ветвей. Этот вывод присоединяется к сборным шинам, а концы обмоток — к нагрузке ветвей.

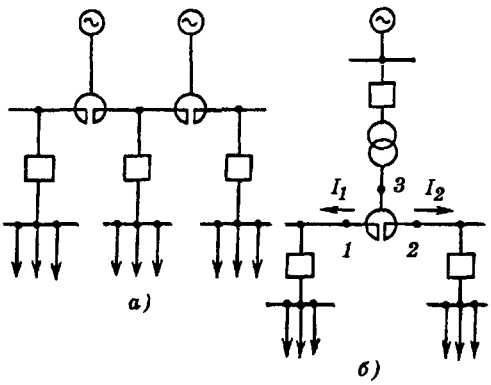


Рис. 23.12. Схемы включения сдвоенных реакторов
а — секционных; б — группового

Сдвоенный реактор имеет две ветви тока I_1 и I_2, намотанные согласно. Схемы включения показаны на рис. 23.12. Источник питания присоединен к точке *3*, нагрузки — к точкам *1* и *2*. В нормальном режиме токи в ветвях направлены встречно. Падение напряжения на ветви *1* (без учета активного сопротивления обмотки)

$$\Delta U_1 = I_1 x_{0,5} - I_2 x_м ,$$

где I_1 и I_2 — токи в ветвях; $x_{0,5}$ — индуктивное сопротивление одной ветви; $x_M = \omega M$ — индуктивное сопротивление взаимной индукции ветвей.

В качестве номинального тока $I_{ном}$ сдвоенного реактора принимается номинальный ток ветви. Номинальное иидуктивное сопротивление такого реактора равно сопротивлению одной ветви.

Номинальное индуктивное сопротивление ветви реактора, %, равно:

$$x_{ном\ \%} = \frac{I_{ном}\, x_{0,5} \sqrt{3}}{10\, U_{ном}} .$$

Одной из основных характеристик сдвоенного реактора является коэффициент связи

$$k = \frac{x_M}{x_{0,5}} = \frac{M}{L_{0,5}} ,$$

где $L_{0,5}$ — индуктивность одной ветви реактора.

Сдвоенный реактор позволяет уменьшить падение напряжения в номинальном режиме и сократить габариты распределительного устройства.

Различают три режима работы сдвоенных реакторов. Режим № 1 — ток короткого замыкания протекает в ветви тока I_2. В ветви тока I_1 течет номинальный ток или ток отсутствует. В этом случае в обмотке ветви тока I_1 наводится дополнительная ЭДС от потока взаимной индукции от ветви тока I_2:

$$E_{навед} = I_{к2}\, \omega\, M ,$$

где $I_{к2}$ — ток КЗ в вторичной ветви.

Ток короткого замыкания определяется индуктивным сопротивлением ветви $x_{0,5}$.

В режиме № 2 ветви обтекаются токами одного направления. Точка *3* отсоединена от схемы. При этом падение напряжения в ветви

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = I_1 x_{0,5} + I_2 x_M = I_1 x_{0,5} (1 + k) .$$

Индуктивное сопротивление ветви реактора $x_{0,5c}$ в режиме № 2 (согласное включение)

$$x_{0,5c} = x_{0,5} (1 + k).$$

В режиме № 3 токи короткого замыкания имеют встречные направления

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = I_к (x_{0,5} - x_M).$$

В режиме № 3 (встречное включение)

$$x_{0,5в} = x_{0,5} (1 - k).$$

В большинстве случаев $k = 0,4 \div 0,6$ и ограничивается как электродинамической стойкостью реактора, так и ЭДС, наведенной в холостой ветви в режиме № 1.

Наиболее тяжелый режим работы в отношении электродинамической стойкости имеет место в случае режима № 3.

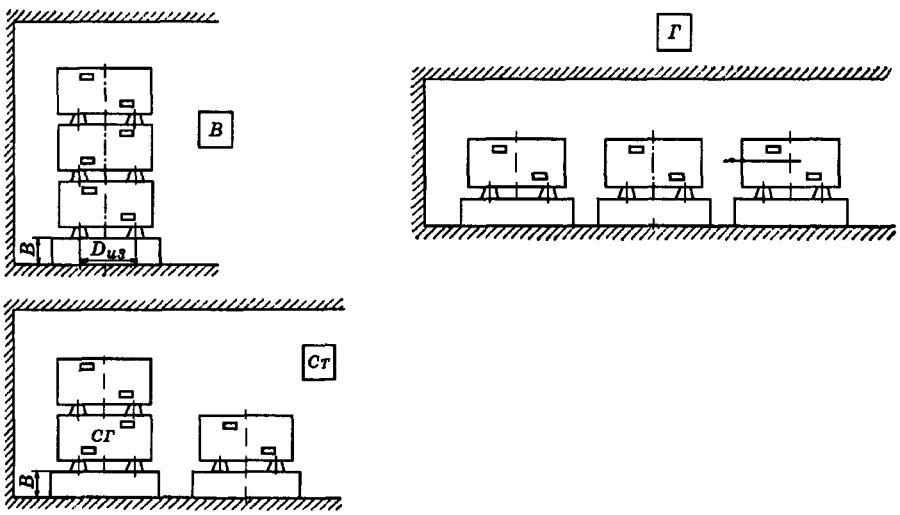


Рис. 23.13. Способы установки реакторов

ПАРАМЕТРЫ ВЫПУСКАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

Для ограничения токов короткого замыкания в электроустановках 6 и 10 кВ изготовляются бетонные реакторы с алюминиевой обмоткой серии РБ (одинарные) и РБС (сдвоенные), которые могут иметь естественное воздушное или принудительное (буква Д в маркировке типа) охлаждение.

Особенности способа монтажа трехфазного комплекта обозначаются буквами: *В* — вертикальная; *Ст* — ступенчатая установка фаз; *Г* — горизонтальная установка фаз (рис. 23.13). Отсутствие этих букв означает, что реактор предназначен для вертикальной установки фаз. Технические данные бетонных реакторов приведены в табл. 23.20 и 23.21.

В цифровом обозначении первое число — номинальное напряжение, кВ; второе — номинальный ток, А; третье — номинальное индуктивное сопротивление, Ом.

В помещении, отведенном для реактора, не должно быть предметов из магнитного материала, не допускаются металлические замкнутые контуры, охватывающие магнитное поле реактора (например, металлоконструкции)

ВЫБОР ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

1. Номинальное напряжение реактора $U_{ном} = U_{ном.\ сети}$.

2. Номинальный ток реактора $I_{ном} \geq I_{ном.\ расч}$, где $I_{ном.\ расч} = k_п I_{ном.\ уст}$, $k_п$ — нормированный коэффициент перегрузки; $I_{ном.\ уст}$ — номинальный ток установки.

3. Значение индуктивного сопротивления линейного реактора выбирается таким образом, чтобы ограничить ток короткого замыкания до требуемого предела. Последний определяется номинальным током отключения линейного выключателя $I_{о.\ ном}$ или сечением применяемых кабелей.

Допустим, выключатель имеет $I_{о.\ ном.}$. Тогда допустимое сопротивление цепи КЗ равно

$$z_{КЗ\ доп} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\, I_{о.\ ном}}.$$

Допустимое сопротивление реактора

$$x_р = \sqrt{Z^2_{КЗ\ доп} - R^2_{кб}} - x_с - x_{кб},$$

где $R_{кб}$ — активное сопротивление кабеля до точки *КЗ*, Ом; $x_с$ — сопротивление источника до реактора, Ом; $x_{кб}$ — индуктивное сопротивление кабеля до точкн КЗ, Ом.

Аналогично производится выбор по допустимому току кабеля.

4. Выбор секционного реактора:

а) Для уменьшения тока КЗ и облегчения аппаратуры между секциями включается секционный реактор (рис. 23.14, *G*, G_1, G_2 — источники питания). Сопротивление секционного реактора $x_р$ выбирается таким, чтобы при протекании возможного максимального тока нагрузки потеря напряжения была не более 5 %:

Таблица 23.20. Технические данные одинарных бетонных реакторов

Тип	Ток термической стойкости, кА при $t = 8$ с	Потери на фазу, кВт	Электродинамическая стойкость, кА	Масса фазы, т
Для внутренней установки				
РБ, РБУ, РБГ10-400-0,35	9,8	1,6	25	0,88
РБ, РБУ, РБГ10-400-0,45	9,8	1,9	25	0,88
РБ, РБУ, РБГ10-630-0,25	15,75	2,5	40	0,93
РБ, РБУ10-630-0,40	12,6	3,2	32	1,16
РБГ10-630-0,40	12,6	3,2	33	1,02
РБ, РБУ, РБГ10-630-0,56	9,45	4,0	24	1,13
РБ, РБУ, РБГ10-1000-0,14	24,8	3,5	63	1,12
РБ, РБУ10-1000-0,22	19,3	4,4	49	1,34
РБГ10-100-0,22	24,8	4,4	55	1,19
РБ, РБУ, РБГ10-1000-0,28	17,5	5,2	45	1,49
РТ, РБУ, РБГ10-1000-0,35	14,6	5,9	37	1,86
РБ, РБУ, РБГ10-1000-0,45	11,4	6,6	29	1,56
РБ, РБУ, РБГ10-1000-0,56	9,45	7,8	24	1,67
РБ, РБУ10-1600-0,14	26	6,1	66	1,77
РБГ10-1600-0,14	31,1	6,1	79	1,61
РБ, РБУ10-1600-0,20	20,5	7,5	52	2,04
РБГ10-1600-0,29	23,6	7,5	60	1,83
РБ, РБУ, РБГ10-1600-0,25	19,3	8,3	49	2,23
РБ, РБУ, РБГ10-1600-0,35	14,6	11,0	37	2,53
РБД, РБДУ10-1600-0,14		11,0	66	2,38
РБГ10-2500-0,14	31,1	11,0	79	2,07
РБД,РБДУ10-2500-0,20	26,5	14,0	52	2,46
РБГ10-2500-0,20	23,6	14,0	60	2,18
РБДГ10-2500-0,25	19,3	16,1	49	2,74
РБДГ10-2500-0,35	14,6	20,5	37	3,04
РБДГ10-4000-0,105	38,2	18,5	97	2,16
РБДГ10-4000-0,28	25,6	27,7	65	2,89
Для наружной установки				
РБНГ10-1000-0,45	11,4	7,2	29	1,88
РБНГ10-1000-0,56	9,45	8,2	24	1,94
РБНГ10-1600-0,25	19,3	9,8	49	1,88
РБНГ10-1600-0,35	14,6	12,8	37	2,11
РБНГ10-2500-0,14	31,1	13,5	79	2,12
РБНГ10-2500-0,20	23,6	16,8	60	2,33
РБНГ10-2500-0,25	19,3	19,7	49	2,80
РБНГ10-2500-0,35	14,6	23,9	37	3,26

$$\Delta U_{\%} = \frac{\sqrt{3}\, x_р\, I_{max} \sin\varphi}{U_{ном}} \cdot 100 \leq 5\ \%,$$

где $x_р$ — сопротивление реактора, Ом; I_{max} — максимальное значение тока нагрузки через реактор, (дей-

Таблица 23.21. Технические данные сдвоенных бетонных реакторов

Тип	Индуктивное сопротивление ветви при встречном токе, Ом	Коэффициент связи	Потери на фазу, кВт	Электродинамическая стойкость при КЗ в одной ветви, кА	Электродинамическая стойкость при встречных токах, кА	Масса фазы, Т	Ток термической стойкости, кА, при t = 8 с
Для внутренней установки							
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×630-0,25	0,135	0,46	4,8	40	14,5	1,44	15,75
РБС, РБСУ 10-2×630-0,40	0,200	0,50	6,3	32	12,5	1,68	12,5
РБСГ 10-2×630-0,40	0,200	0,50	6,3	33	12,5	1,68	33
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×630-0,56	0,263	0,53	7,8	24	11,0	1,91	9,45
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×1000-0,14	0,071	0,49	6,4	63	21,0	1,90	24,8
РБС, РБСУ 10-2×1000-0,22	0,103	0,53	8,4	49	18,5	2,02	19,3
РБСГ 10-2×1000-0,22	0,103	0,53	8,4	55	18,5	1,94	21,65
РБС, РБСУ, РБСГ 10-2×1000-0,28	0,132	0,53	10,0	45	16,0	2,38	17,75
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,35	0,159	0,55	11,5	37	15,0	2,44	14,6
РБСГ 10-2×1000-0,35	0,159	0,55	11,5	37	15,0	2,28	14,6
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,45	0,230	0,49	13,1	29	13,5	2,40	11,4
РБСГ 10-2×1000-0,45	0,230	0,49	13,1	23	13,5	2,40	11,4
РБСД, РБСДУ 10-2×1000-0,56	0,280	0,50	15,7	24	13,0	2,82	9,45
РБСГ 10-2×1000-0,56	0,280	0,50	15,7	24	13,0	2,82	9,45
РБС, РБСУ 10-2×1600-0,14	0,062	0,56	11,5	66	26,0	2,96	26
РБСД, РБСДУ 10-2×1600-0,20	0,098	0,51	14,3	52	22,0	3,12	20,5
РБСГ 10-2×1600-0,14	0,062	0,56	11,5	79	26,0	2,68	31,1
РБСГ 10-2×1600-0,20	0,098	0,51	14,3	60	22,0	3,12	23,6
РБСД, РБСДУ 10-2×1600-0,25	0,119	0,52	16,7	49	20,0	3,47	19,3
РБСДГ 10-2×1600-0,25	0,119	0,52	16,7	49	20,0	3,30	19,3
РБСДГ 10-2×1600-0,35	0,197	0,46	22,0	37	18,5	3,85	14,6
РБСДГ 10-2×2500-0,14	0,067	0,52	22,5	79	29,5	3,50	31,1
РБСДГ 10-2×2500-0,20	0,109	0,46	32,1	60	26,0	3,89	23,6
Для наружной установки							
РБСНГ 10-2×1000-0,45	0,251	0,44	15,4	29	16,0	3,09	11,4
РБСНГ 10-2×1000-0,56	0,330	0,41	17,5	24	15,0	3,27	9,45
РБСНГ 10-2×1600-0,25	0,123	0,51	22,1	49	22,0	3,18	19,3
РБСНГ 10-2×2500-0,14	0,056	0,60	29,3	79	34,0	3,75	31,1

ствующее значение) А; φ — угол сдвига фаз между током и напряжением в реакторе; $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети. Пример выбора дан в [23.26].

б) Для решения вопроса об установке секционного реактора производится расчет токов КЗ и выбор выключателей для случая отсутствия секционного реактора и при его наличии. Подсчитывается стоимость установки для этих случаев. Схема с секционным реактором используется тогда, когда она дает экономию не менее 10% стоимости установки без реактора [23.26].

5. Расстояние между реакторами и стенками, потолком и полом ячейки выбирается по рекомендациям каталогов. Точно также выбираются расстояния между осями реакторов при горизонтальной и ступенчатой установке [23.25, 23.26].

6. Сравнивается ток динамической стойкости реактора $i_{дин}$ с ударным током КЗ:

$$i_{дин} \geq i_{уд.\ КЗ},$$

где $i_{дин}$, $i_{уд.\ КЗ}$ — мгновенные значения тока.

Для сдвоенного реактора берется случай одновременного замыкания на ветвях (если такой случай возможен).

7. Сравнивается ток термической стойкости реактора $I_т$ при времени $t_т$ с током КЗ $I_{КЗ}$ при реальном времени КЗ $t_{КЗ}$

$$I_т^2\, t_т \geq I_{КЗ}^2\, t_{КЗ},$$

где $I_т$, $I_{КЗ}$ — действующие значения тока.

Для компенсации реактивной мощности, генерируемой линиямн электропередачи с номнпальным напряжением до 1150 кВ, применяются шунтирующие реакторы. Маркировка: Р — реактор, О — однофазный, Т — трехфазный, М — масляный, ДЦ — охлаждение масляное с дутьем и

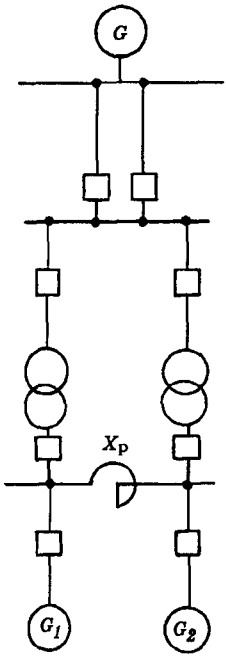


Рис. 23.14. Схема включения секционного реактора

принудительной циркуляцией масла, первое число — номинальная мощность, кВ· А; второе число — класс напряжения, кВ.

Технические данные шунтирующих реакторов приведены в табл. 23.22.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного тока применяются реакторы сернй ФРОС, СРОМ:

ФРОС — фильтровый (сглажнвающий) реактор, однофазный, сухой, с естественным воздушным охлаждением, предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в схемах электропривода. Технические данные реакторов серии ФРОС при параллельном соединении обмоток приведены в табл. 23.23.

СРОМ — сглажнвающнй однофазный реактор с естественным масляным охлаждением, предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в схемах управляемых выпрямнтелей. Технические данные реакторов серии СРОМ прнведены в табл. 23.24.

В цепях заряда емкости применяются реакторы серии ЕРОС и ЕРОМ. Технические данные реакторов этих серий приведены в табл. 23.25 и 23.26. В обозначенин реакторов первое число — типовая мощность, кВ· А; второе — класс напряжения.

Для ограничения токов в схемах тиристорных преобразователей для электроприводов применяются реакторы серии РТСТ (реактор трехфазный, сухой, токоограннчивающий). В обозначении реактора первое число — номинальный фазный ток, А; второе число — номинальная индуктивность

Таблица 23.22. Технические данные шунтирующих реакторов компленсации

Тип реактора	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, кВ· А	Потери, кВт	Масса, кг
РОМ-1200/10	$6{,}6/\sqrt{3}$ $11/\sqrt{3}$	1100	20	38000
РТД-20000/35	38,5	22000	120	31500
РОД-30000/35	$38{,}5/\sqrt{3}$	30000	180	35100
РОД-33333/110	$121/\sqrt{3}$	33333	180	39100
РОДЦ-60000/500	$525/\sqrt{3}$	60000	205	66600
РОДЦ-110000/750	$787/\sqrt{3}$	110000	305	95000

Таблица 23.24. Технические данные сглаживающих реакторов серии СРОМ

Тип реактора	Индуктианость, Гн	Постоянный ток, А	Масса, кг
СРОМ-500/10	0,25	75	1300
СРОМ-1000/10	0,05	250	350
СРОМ-1500/10	0,2	150	3500
СРОМ-5500/20	0,11	360	10850

Таблица 23.23. Технические данные реакторов серии ФРОС

Тип реактора	Номинальный аыпрямлениый ток, А	Индуктивность, мГн	Значение тока, до которого сохраняется индуктивность, А	Потери в меди при номинальном выпрямленном токе, Вт	Масса, кг
ФРОС-800	1600	0,5	3200	1500	1675
ФРОСЗ*-800	2500	0,2	5000	1550	1675
ФРОС-1250	2500	0,32	5000	2500	1990
ФРОСЗ-1250	4000	0,12	8000	2550	1990
ФРОС-2000	4000	0,2	8000	3300	3050
ФРОСЗ-2000	6300	0,08	12600	3500	3050
ФРОС-3200	6300	0,125	12600	4800	—
ФРОСЗ-3200					
ФРОС-4000	8000	0,1	16000	5000	—
ФРОСЗ-4000					
ФРОС-5000	10000	0,08	20000	6000	—
ФРОСЗ-5000					

* ФРОСЗ — реакторы защищенного исполнения (в кожухе).

Таблица 23.25. Технические данные зарядных реакторов серии ЕРОС

Тип реактора	Номинальная индуктивность, Гн	Номинальный постоянный ток, А	Потери в реакторе при 115 °С, Вт	Масса, кг
ЕРОС-1000/0,5	3	31,6	1300	1350
ЕРОС-400/10	7,5	11	1000	—
ЕРОС-4000/10	12	9,03	1500	1400

фазы, мГн. Технические данные реакторов серии РТСТ приведены в табл. 23.27. Реакторы выдерживают ток трехфазного короткого замыкания в течение 0,5 с при приложении номинального напряжения сети, указанного в таблице.

Для компенсации емкостн токов замыкания на землю применяются заземляющие реакторы серий РЗДСОМ (реактор заземляющнй, дугогасящнй с плавным регулированнем, однофазный, масляный). Параметры этих реакторов приведены в табл. 23.28. Ступенчатое регулирование осуществляется вручную на отключенном от сетн реакторе, число ответвлений пять. Плавное регулированне осуще-

Таблица 23.26. Технические данные зарядных реакторов серии ЕРОМ

Тип реактора	Номинальный пульсирующий ток (действующий), А	Максимальное значение пульсирующего тока, А	Частота пульсирующего тока, Гц	Длительность импульса тока за период, мс	Номинальная индуктивность, Гн	Полная масса, кг
ЕРОМ-350/6	105	240	50	7,7	0,036	1300
ЕРОМ-300/10	35	50	100	10	0,6	1900
ЕРОМ-400/10	9,7	13,6	15	67	14	1900
ЕРОМ-1000/10	35	50	25	40	2,4	2800
ЕРОМ-1200/10	1060	2600	100	3,3	0,0014; 0,00035	3750
ЕРОМ-5000/10	4000	6250	125	6000	0,00735	29600

Таблица 23.27. Технические данные реакторов серии РТСТ

Тип реактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный фазный ток, А	Номинальная индуктианость фазы, мГн	Актианое сопротивление обмоток, мОм	Масса, кг
РТСТ-20,5-1,08	220	20,5	1,08	150	10
РТСТ-20,5-1,53	310	20,5	1,53	192	12
РТСТ-20,5-2,02	410	20,5	2,02	233	14
РТСТ-41-0,54	220	41	0,54	54	15
РТСТ-41-0,76	310	41	0,76	70,8	19
РТСТ-41-1,01	410	41	1,01	88,5	23
РТСТ-82-0,27	220	82	0,27	19,4	25
РТСТ-82-0,38	410	82	0,38	25,2	32
РТСТ-82-0,505	410	82	0,505	31,7	40
РТСТ-165-0,135	220	165	0,135	10,7	44
РТСТ-165-0,19	310	165	0,19	13,9	52
РТСТ-165-0,25	410	165	0,25	17,1	62
РТСТ-265-0,08	220	265	0,084	5,2	55
РТСТ-265-0,118	310	265	0,118	6,7	68
РТСТ-265-0,256	410	265	0,256	8,35	80
РТСТ-410-0,54	220	410	0,054	2,65	76
РТСТ-410-0,076	310	410	0,076	3,34	89
РТСТ-410-0,101	410	410	0,101	4,05	103
РТСТ-660-0,034	220	660	0,034	1,12	104
РТСТ-660-0,048	310	660	0,048	1,5	130
РТСТ-660-0,064	410	680	0,064	1,8	145
РТСТ-820-0,027	220	820	0,027	0,815	130
РТСТ-820-0,038	310	820	0,038	0,992	151
РТСТ-820-0,0505	410	820	0,0505	1,23	176

Таблица 23.28. Заземляющие дугогасящие реакторы (ГОСТ 19470-74)

Тип	Реактивная мощность, кВ· А	Номинальное напряжение, кВ		Пределы регулирования токов, А	Габариты, мм		Масса, кг
		сети	реактора		Высота	В плане	
Со ступенчатым регулированием							
РЗДСОМ-115/6	115	6	3,81	12,5—25	—	—	—
РЗДСОМ-230/6	230	6	3,81	25—50	2000	1200×1400	1200
РЗДСОМ-460/6	460	6	3,81	50—100	2600	1400x1700	2000
РЗДСОМ-920/6	920	16	3,81	100—200	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-190/10	190	10	6,35	12,5—25	—	—	—
РЗДСОМ-380/10	380	10	6,35	25—50	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-760/10	760	10	6,35	50—100	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-1520/10	1520	10	6,35	100—200	3100	1600×2200	4000
РЗДСОМ-115/15; 75	115	15	9,09	5—10	2000	1200×1400	1100
РЗДСОМ-155/20	155	20	12,97	6,25—12,5	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-310/35	310	35	22,2	6,25—12,5	2600	1400×1700	2000
РЗДСОМ-620/35	620	35	22,02	12,5—25	2700	1500×1800	2500
РЗДСОМ-1240/35	1240	35	22,02	25—50	3100	1600×2200	4000
С плавным регулированием							
РЗДПОМ-120/6	120	6	3,81	5,2—26,2	2200	1500×1700	2200
РЗДПОМ-300/6	300	6	3,81	13,1—65,5	2600	1700×1900	3200
РЗДПОМ-190/10	190	10	6,35	5,0—25	2200	1500×1700	2800
РЗДПОМ-480/10	480	10	6,35	12,6—63	2600	1900×2300	4500
РЗДПОМ-480/20	480	20	12,7	6,3—31,4	—	—	—
РЗДПОМ-700/35	700	35	22,2	5,7—28,4	—	—	—
РЗДПОМ-800/35	800	35	22,2	7,2—36	—	—	—

ставляется путем изменения воздушного зазора в магнитопроводе с помощью электропривода без отключения реактора от сети и при отсутствии замыкання на землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

23.1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977.

23.2. Чунихин А.А. Электрическне аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1988.

23.3. Врублевский Л.Е., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Силовые резисторы. М.: Энергоатомиздат, 1991.

23.4. ГОСТ 9219-88. Аппараты электрические тяговые. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1988.

23.5. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969.

23.6. Варшавский Д.С. Силовые конденсаторы // Итоги науки и техн. ВИНИТИ. Сер. Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели. Т. 16, 1991.

23.7. Гулевич А.И., Киреев А.П. Производство силовых конденсаторов. М.: Высшая школа, 1975.

23.8. Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973.

23.9. ГОСТ 1282-88. Конденсаторы для повышения коэффнциента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 и 60 Гц. М.: Изд-во стандартов, 1988.

23.10. ГОСТ 18689-81Е. Конденсаторы для электротермических установок на частоту от 0,5 до 10,0 кГц. М.: Изд-во стандартов, 1981.

23.11. ГОСТ 15581-80Е. Конденсаторы связи и отбора мощности для линий электропередач. М.: Изд-во стандартов, 1981.

23.12. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1983.

23.13. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Под ред. Г.С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987.

23.14. ГОСТ 21313-75. Резисторы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976.

23.15. ГОСТ 21315-75. Конденсаторы постоянной емкости. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976.

23.16. ГОСТ 12.2.007-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. М.: Изд-во стандартов, 1985.

23.17. ГОСТ 12.2.007.5-75. Система стандартов безопасности труда. Конденсаторы силовые. Установки конденсаторные. Требования безопасности. М.: Изд-во стандартов, 1985.

23.18. Лейтес Л.В. Тороидальные реакторы. М.: Информэлектро, 1966.

23.19. **Карасев В.В., Кубарев Л.П., Лейтес Л.В.** Обобщенный аналитический метод оптимизации н оценки параметров реакторов // Электротехника, 1977. № 4. С. 1—8.

23.20. ***Стернин В.Г., Карпенский А.К.*** *Сухие* токоограничивающие реакторы. М.: Энергия, 1965.

23.21. **Лейтес Л.В.** О стандарте на терминологию реакторов // Электротехника, 1974. № 4. С. 39—42.

23.22. **ГОСТ 18624-73.** Реакторы электрические. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1973.

23.23. **ГОСТ 12.2.007.2-75.** Система стандартов безопасности труда. Трансформаторы силовые и реакторы электрические. Требования безопасностн М.: Изд-во стандартов, 1985.

23.24. **Электротехнический** справочник. Том 2 М.: Энергоатомиздат, 1986.

23.25. **Чунихин А.А., Жаворонков М.А.** Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомнздат, 1985.

23.26. ***Сборник*** *типовых задач по курсу* Электрическая часть электростанций. Условия работы и выбора электрооборудования электростанций / Под ред. Б.Н. Неклепаева. М.: Моск. энерг. ин-т, 1984.

23.27. **Неклепаев Б.Н., Крючков И. П.** Электрическая часть электростанций и подстанций Справочные материалы для курсового и дипломио го проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1989.

23.28. **Соколов В.П.** Расчет токоограничивающих реакторов. М.: Моск. энерг. ин-т, 1985.

Раздел 24

ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

24.1. Основные определения и обозначения 125
24.2. Основные части трансформатора . . . 126
24.3. Конструктивные типы трансформаторов 126
24.4. Принцип работы 127
24.5. Обозначения, схемы и группы соединения обмоток трансформатора 128
24.6. Параллельная работа трансформаторов 129
24.7. Несимметричная нагрузка трехфазных двухобмоточных трансформаторов . . 129
24.8. Трансформаторы с расщепленными обмотками 131
24.9. Автотрансформаторы 131
24.10. Регулирование и стабилизация напряжения трансформаторов 132
24.11. Системы охлаждения трансформаторов 134
24.12. Нагрузочная способность трансформаторов 137
24.13. Технические данные трансформаторов 137
Список литературы 157

24.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Различают двух-, трех- и многообмоточные трансформаторы, имеющие соответственно две, три и более гальванически не связанные обмотки. Передача энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную происходит посредством магнитного поля.

Автотрансформатором называется трансформатор, две или более обмотки которого гальванически связаны так, что они имеют общую часть. Обмотки автотрансформатора связаны электрически и магнитно, и передача энергии из первичной цепи во вторичную происходит как посредством магнитного поля, так и электрическим путем. Помимо гальванически связанных обмоток автотрансформатор может иметь и другие обмотки, не имеющие гальванической связи.

Трансформатор называется силовым, если он применяется для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. К силовым относятся трансформаторы трехфазные и многофазные мощностью 6,3 кВ·А и более, однофазные мощностью 5 кВ·А и более. При меньших мощностях трансформаторы называются трансформаторами малой мощности. Различают силовые трансформаторы общего назначения, предназначенные для включения в сети, не отличающиеся особыми условиями работы, или для непосредственного питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы, и силовые трансформаторы специального назначения, предназначенные для непосредственного питания сетей или приемников электрической энергии, если эти сети или приемники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. К числу таких сетей и приемников электрической энергии относятся, например подземные рудничные и шахтные сети и установки, выпрямительные установки, электрические печи и т. п.

При работе в трансформаторе создается магнитное поле, которое для расчетов, определения параметров можно условно разделить на две части: основное поле и поле рассеяния. Основное поле характеризуется магнитным потоком, который замыкается по магнитопроводу и сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Поток поля рассеяния замыкается частично или полностью вне магнитопровода и не сцеплен с витками всех обмоток.

В прилагаемых к трансформатору сопроводительных документах изготовителем указываются номинальные данные: мощность, напряжение обмоток, частота и т. д., обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативными документами.

Для масляных силовых трансформаторов общего назначения номинальными условиями места установки и охлаждающей среды согласно ГОСТ 11677-85 являются: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура охлаждающей среды: для воды — не более +25 °С у входа в охладитель, для воздуха — естественно изменяющаяся температура охлаждающего воздуха не более +40 °С при среднесуточной температуре не более +30 °С и среднегодовой температуре не более +20 °С; температура окружающего воздуха не ниже —45 °С.

Номинальной мощностью двухобмоточного трансформатора является номинальная мощность каждой из его обмоток, в трехобмоточном трансформаторе — наибольшая из номинальных мощностей трех его обмоток.

За номинальное напряжение обмотки принимается напряжение между соответствующими зажимами, связанными с данной обмоткой при холостом ходе трансформатора.

Основные обозначения: S — мощность, В·А, кВ·А; $S_ф$ — мощность на одну фазу, В·А, кВ·А;

$P_к$ — потери короткого замыкания, Вт; $P_х$ — потери холостого хода, Вт; E — действующее значение ЭДС, В; U — действующее значение напряжения, В; I — действующее значение тока, А; J — плотность тока, А/м^2; $Ф$ — рабочий магнитный поток, Вб; B — магнитная индукция, Тл; $I_х$, $I_а$, $I_р$ — действующее значение тока холостого хода и его активная и реактивная составляющие, А; i_0 — ток холостого хода в процентах к номинальному, %; $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ — полные сопротивления обмоток, Ом; $\underline{Z} = r + jx$ — сопротивление фазы нагрузки, Ом; $u_к$, $u_а$, $u_р$ — напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие, %; w — число витков в обмотке; m — число фаз.

Индексы величин: н — номинальных; ф — фазных; р — относящихся к рассеянию; х — относящихся к холостому ходу; к —относящихся к короткому замыканию; в — относящихся к витку.

24.2. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Основными частями трансформатора являются магнитная система (магнитопровод), обмотки и система охлаждения.

Магнитная система изготавливается обычно из электротехнической стали или иного ферромагнитного материала и служит для локализации основного магнитного потока.

Обмотки изготавливаются из медного или алюминиевого изолированного провода или фольги и представляют собой совокупность витков, в которых наводятся ЭДС. В трехфазном траисформаторе под обмоткой обычно понимают совокупность соединенных между собой обмоток одного напряжения разных фаз. В двухобмоточном трансформаторе различают обмотку высшего напряжения (ВН), присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку низшего напряжения (НН), присоединяемую к сети более низкого напряжения. Обмотку трансформатора, к которой подводится электрическая энергия, называют первичной, а обмотку, от которой энергия отводится, — вторичной. В трехобмоточном трансформаторе различают обмотки высшего (ВН), средиего (СН) и низшего (НН) напряжений.

Единая конструкция, включающая в собранном виде остов трансформатора, обмотки с их изоляцией, отводы, т. е. проводники, соединяющие обмотки между собой и с другими частями трансформатора, части устройства регулирования напряжения, а также все детали, служащие для их механического соединения, называется активной частью трансформатора.

Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением (сухие трансформаторы) обычно не имеют специальной системы охлаждения. В масляных трансформаторах в систему охлаждения входят бак трансформатора, заливаемый маслом, а для мощных трансформаторов еще и охладители, вентиляторы, масляные насосы, теплообменники и т. д.

24.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основные конструктивные типы трансформаторов связаны с конструкцией их магнитных систем, которые можно отнести к двум основным видам стержневому и броневому.

Стержневой тип магнитопровода характеризуется тем, что ярма соединяют концы разных стержней, а каждое ярмо располагается только со стороны торцов стержней и обмоток (рис. 24.1).

Броневой тип трансформатора характеризуется тем, что оба конца каждого стержня соединяются не менее чем двумя боковыми ярмами, т. е. ярма охватывают не только торцы, но и боковые поверхности обмоток, полностью прикрывая, "бронируя" их (рис. 24.2).

Стержневой тип магнитопровода получил преимущественное распространение для силовых трансформаторов.

При мощностях свыше 100 000 кВ·А применяют стержневой магнитопровод с разветвленными ярмами (рис. 24.3), называемый бронестержневым.

По взаимному расположению стержней и ярм магнитопроводы подразделяются на плоские, у которых продольные оси всех стержней и ярм расположены в одной плоскости (рис. 24.1, 24.2, 24.3), и пространственные, у которых оси стержней и ярм расположены в разных плоскостях (рис. 24.4).

По расположению обмоток трансформаторы подразделяются на:

а) трансформаторы с концентрическими обмотками — обмотки ВН и НН (а также СН) выполняются в виде цилиндров и располагаются на стержне концентрически. Концентрические обмотки могут располагаться на стержнях силовых трансформато-

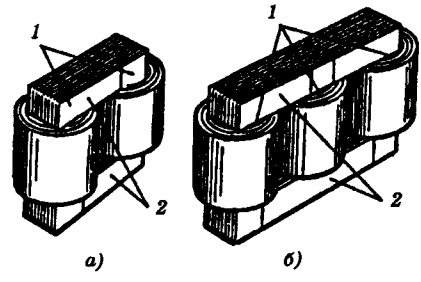


Рис. 24.1. Стержневые магнитопроводы однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) трансформаторов

1 — стержень; *2* — торцевое (верхнее и нижнее) ярмо

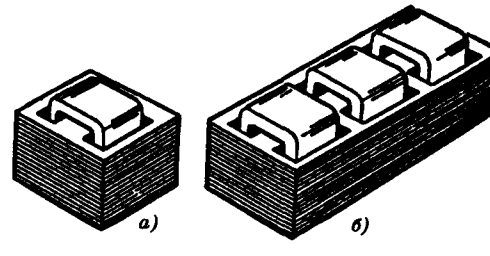


Рис. 24.2. Броневые магнитопроводы однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) трансформаторов

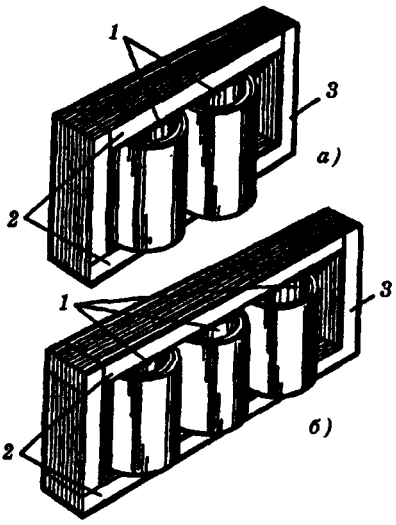


Рис. 24.3. Бронестержневые магнитопроводы однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) трансформаторов
1 — стержень; *2* — торцевое ярмо; *3* — боковое ярмо

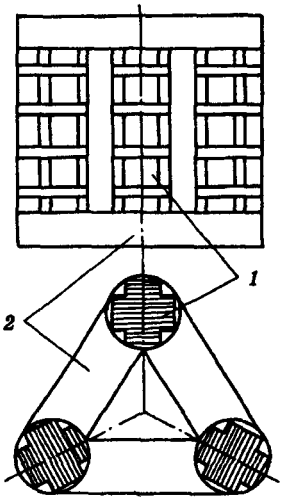


Рис. 24.4. Пространственная магнитная система
1 — стержень; *2* — ярмо

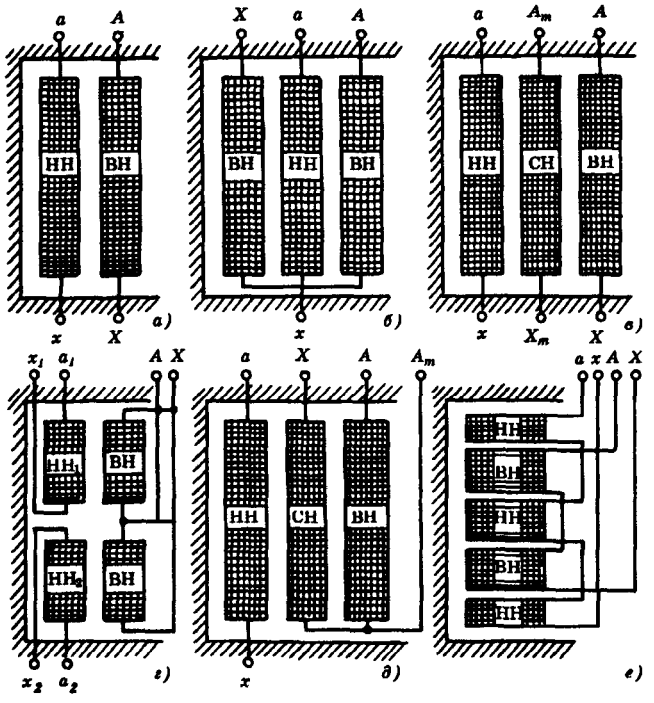


Рис. 24.5. Расположение обмоток силовых трансформаторов. Концентрические обмотки (*а* — *д*)
а — двухобмоточный трансформатор; *б* — двойная концентрическая обмотка ВН; *в* — трехобмоточный трансформатор; *г* — расщепленная обмотка НН; *д* — трехобмоточный автотрансформатор; *е* — чередующиеся обмотки

ров и автотрансформаторов в различном порядке (рис. 24.5, *а*—*д*).

б) трансформаторы с чередующимися обмотками: обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров и располагаются, чередуясь, в осевом направлении (рис. 24.5, *е*).

24.4. ПРИНЦИП РАБОТЫ

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции.

При подключении первичной обмотки к сети переменного тока по ней потечет ток i_0, который создаст в магнитопроводе переменный маг-

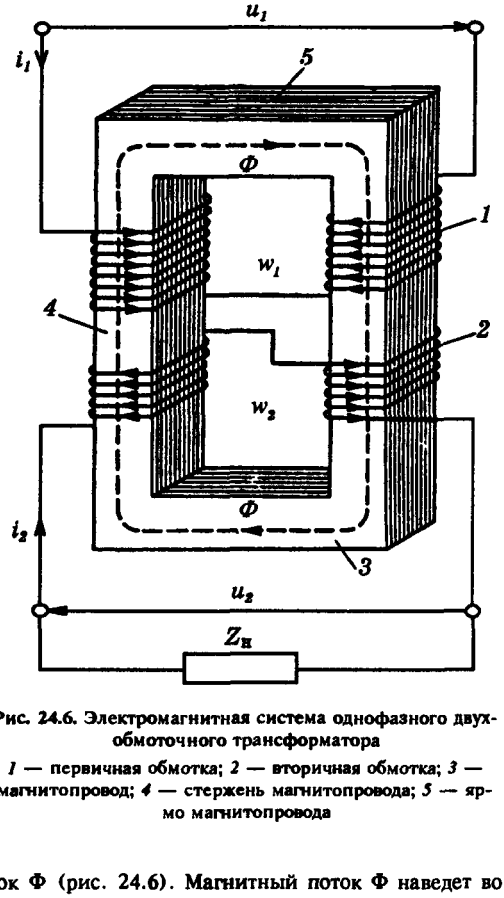


Рис. 24.6. Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора

1 — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка; *3* — магнитопровод; *4* — стержень магнитопровода; *5* — ярмо магнитопровода

ток Ф (рис. 24.6). Магнитный поток Ф наведет во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

При холостом ходе $u_2 = e_2$.

Действующее значение ЭДС во вторичной обмотке

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi.$$

Подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, можно при заданном напряжении U_1 получить требуемое $U_2 = E_2$. При $U_1 > U_2$ трансформатор называют понижающим, при $U_1 < U_2$ — повышающим. Если вторичную обмотку нагрузить током i_2, то МДС со стороны вторичной обмотки согласно закону Ленца будет стремиться изменить магнитный поток Ф. Однако в действительности этого не произойдет, так как одновременно увеличится ток i_1 в первичной обмотке, который и компенсирует размагничивающее действие i_2, и поддержит магнитный поток $\Phi \approx \text{const}$.

При замкнутом магнитопроводе ток i_0 составляет 0,5÷3% номинального тока первичной обмотки, что позволяет, рассматривая режим работы под нагрузкой, принимать $i_0 \approx 0$.

24.5. ОБОЗНАЧЕНИЯ, СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Для силовых трансформаторов согласно ГОСТ 11677-85 установлены стандартные обозначения (маркировка) начал и концов (выводов) обмоток и их ответвлений (отводов).

В однофазном трансформаторе началу и конец обмотки ВН обозначают соответственно прописными латинскими буквами A и X, а начало и конец обмотки НН — строчными латинскими буквами a и x. При наличии третьей обмотки с промежуточным (средним) напряжением начало и конец ее обозначают соответственно A_m и X_m.

В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначают соответственно A, B, C и X, Y, Z; начала и концы обмоток СН — A_m, B_m, C_m и X_m, Y_m, Z_m; начала и концы обмоток НН — a, b, c и x, y, z. При этом чередование фаз A, B, C принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН.

Если обмотка ВН или НН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что и начало и конец обмотки, но с цифровыми индексами 1, 2, 3 и т. д.

В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам звезда, треугольник или зигзаг (рис. 24.7), которые соответственно обозначают русскими буквами *У* и *Д* и латинской *Z*. При выводе от нейтрали у схем звезда или зигзаг отвода (ответвления) его обозначают: O — на высшем и низшем, O_m — на среднем напряжении. При этом к буквенным обозначениям схем соединения обмоток добавляют индекс "н" ($У_н$, $Z_н$). При соединении в Z обмотку разделяют на части, концы которых обозначают буквой со штрихом (A', a', B', b', C', c').

Следует отметить, что в технической литературе и в ранее выпущенных трансформаторах можно встретить обозначение схемы звезды латинской буквой Y, схемы треугольника — знаком Δ или греческой буквой Δ, схемы зигзаг — знаком $\curlyvee$, а при наличии выведенной нейтрали — соответственно $\curlyvee$ или $\curlyvee$.

Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора обозначают в виде дроби, в числителе которой ставят обозначение схемы соединения обмотки ВН, а в знаменателе — обмотки НН. Так, если у трансформатора обмотка ВН соединена в треугольник, а обмотка НН — в звезду с выведенной нейтралью, то такое сочетание схем соединения обмоток обозначают $Д/У_н$. При наличии третьей обмотки СН, соединенной, например, в звезду, обозначение схем соединения обмоток трансформатора будет иметь вид $Д/У/У_н$, т. е. обозначение схемы соединения обмотки СН располагают между обозначениями схем соединения обмоток ВН и НН.

В практике эксплуатации трансформаторов кроме указания схем соединения необходимо знать взаимное направление ЭДС в обмотках.

Группа соединения обмоток трансформатора характеризуется угловым смещением векторов линейных ЭДС обмотки НН (в трехобмоточном трансфор-

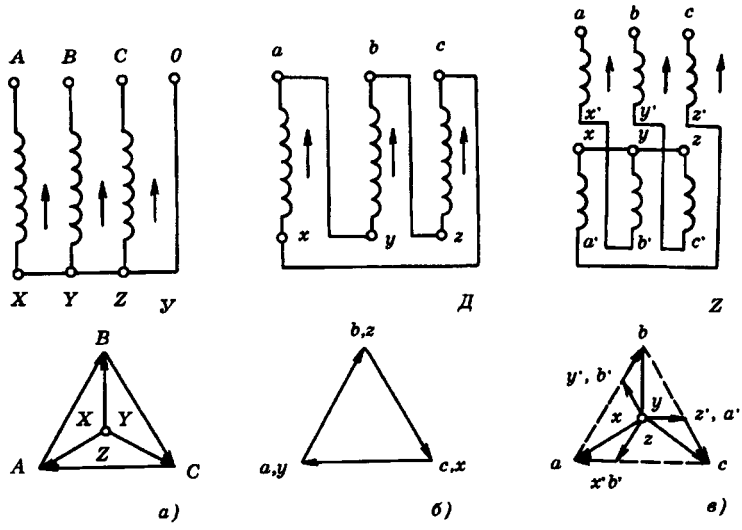


Рис. 24.7. Схемы и векторные диаграммы соединения обмоток трансформатора
а — звезда; *б* — треугольник; *в* — зигзаг

маторе также СН) по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки ВН. Группа обозначается числом, которое следует умножить на 30° (угловое смещение, принятое за единицу) для получения угла смещения в градусах. Угол смещения всегда отсчитывается от вектора линейной ЭДС ВН по часовой стрелке до одноименного вектора ЭДС НН (или СН) (рис. 24.8).

Из всех возможных групп соединений для трехфазных двухобмоточных трансформаторов нормализованы (ГОСТ 11677-85) только две группы: 0 и 11 с выводом в случае необходимости нулевой точки. Однофазные трансформаторы изготавливаются только нулевой группы.

24.6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Параллельной работой двух или нескольких трансформаторов называется работа при параллельном соединении не менее чем двух основных обмоток одного из них с таким же числом основных обмоток другого трансформатора (других трансформаторов).

При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяются к одному и тому же проводу сети.

В целях правильного распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям параллельная работа двухобмоточных трансформаторов допускается при:

1) равенстве номинальных первичных и вторичных напряжений (допускается разность коэффициентов трансформации не более ±0,5%);

2) тождественности групп соединения обмоток;

3) равенстве напряжений короткого замыкания (допускается отклонение не более чем на ±10% средней величины).

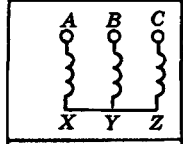
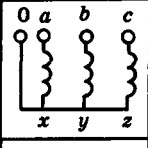
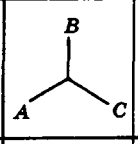
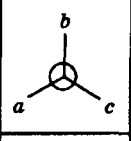
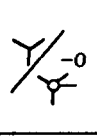
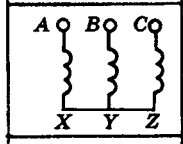
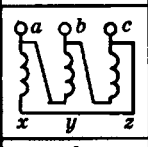
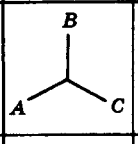
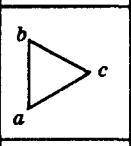
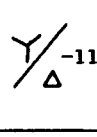
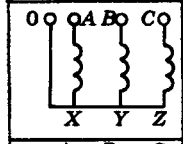
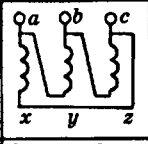
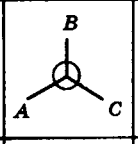
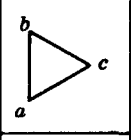
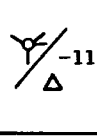
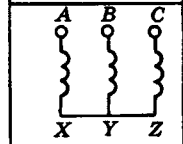
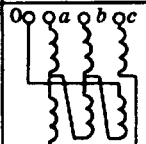
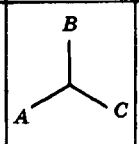
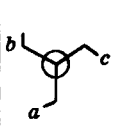
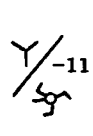
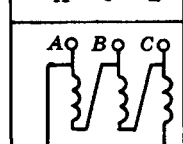
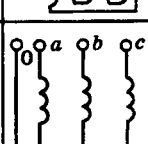
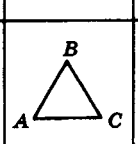
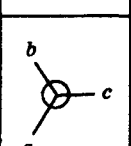
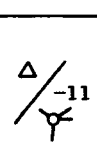
При несоблюдении первого и второго условий в обмотках трансформаторов возникают уравнительные токи, которые в отдельных случаях, особенно при несовпадении групп, могут достигнуть и даже превысить значения тока полного короткого замыкания. Несоблюдение третьего условия приводит к тому, что общая нагрузка распределяется между трансформаторами непропорционально их номинальным мощностям.

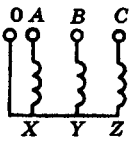
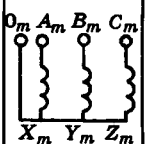
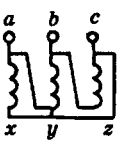
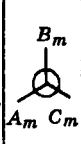
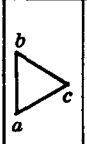
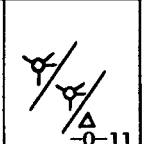
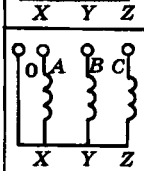
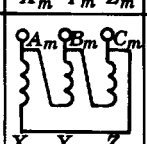
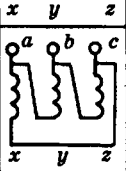
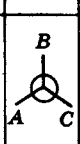
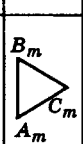
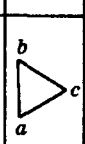
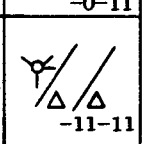
Рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей параллельно работающих трансформаторов не превышало 3:1.

24.7. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трехфазный трансформатор может быть нагружен несимметричной нагрузкой, когда по отдельным фазам протекают разные по значению токи. Такая нагрузка вызывает изменение фазных напряжений трансформатора и поэтому является нежелательной как для трансформатора, так и для питающихся от него потребителей энергии.

При этом на потребителе неблагоприятно сказываются нскаженія симметрии вторичных фазных напряжений. У самого трансформатора несимметричная нагрузка может вызвать перегрузку отдельных обмоток, а также чрезмерное повышение отдельных фазных напряжений и насыщение магнитопровода. Наибольшее искажение симметрии фазных напряжений даже при малейшей несимметрии нагрузки имеет место при схеме соединения обмоток $У/У_н$ в трехфазной группе и в трехфазных броневом и бронестержневом трансформаторах. В трехстержневых трансформаторах с соединением обмоток $У/У_н$ фазные напряжения искажаются значительно меньше. В трансформаторах со схемами соединения обмоток $Д/У_н$, $У/Z_н$, $У/Д/У_н$ независи-

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				
				
				
				
				

Схемы соединения обмоток			Диаграммы векторов ЭДС			Условные обозначения
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						
						

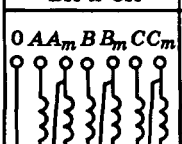
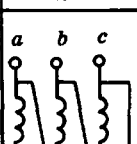
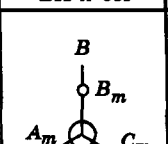
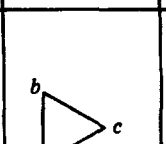
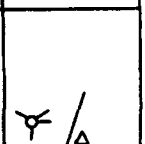
Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				

Рис. 24.8. Схемы и группы соединения обмоток двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов. Для обеих обмоток вид схем дан со стороны ВН

мо от конструкции магнитопровода искажение фазных напряжений меньше, чем в схеме $У/У_н$.

24.8. ТРАНСФОРМАТОРЫ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ

В некоторых случаях с целью создания более рациональных условий коммутации электрических цепей одна из обмоток трансформатора разделяется на две или большее число гальванически не связанных частей, суммарная номинальная мощность которых равна номинальной мощности трансформатора, а напряжения короткого замыкания которых относительно другой обмотки практически равны, так что эти части допускают независимую нагрузку или питание. Такие обмотки, обычно обмотки НН, называются расщепленными. Расположение частей расщепленной обмотки, предназначенной для питания двух независимых сетей, на стержне магнитной системы показано на рис. 24.5, схема соединения обмоток трехфазного трансформатора — на рис. 24.9. При коротком замыкании в цепи одной из частей расщепленной обмотки в обмотках трансформатора возникают токи и напряжения существенно меньшие, чем в том же трансформаторе с нерасщепленной обмоткой НН.

Такие трансформаторы в первом приближении можно рассматривать как два независимых трансформатора *1—2* и *3—4*, питаемых от общей сети.

В повышающих трансформаторах в ряде случаев обмотку НН расщепляют на две или три обмотки, размещенные на разных стержнях общего магнитопровода и питаемые от отдельных генераторов *I*, *II*, *III* (рис. 24.10).

Обмотки ВН на всех стержнях соединяются при этом параллельно. Такой трансформатор также с достаточной точностью можно рассматривать как

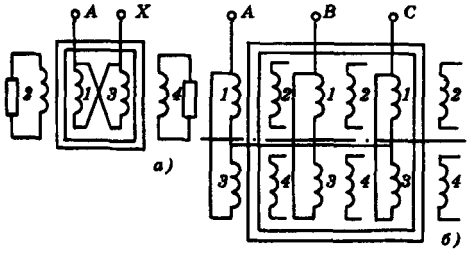


Рис. 24.9. Однофазный (*а*) и трехфазный (*б*) трансформаторы с расщепленными обмотками

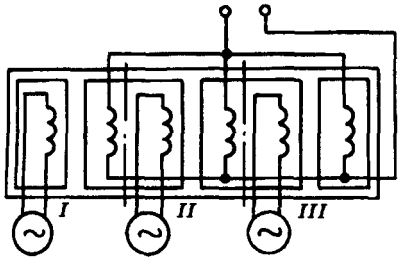


Рис. 24.10. Повышающий однофазный трансформатор с расщепленной обмоткой

два или три независимых параллельно включенных трансформатора. Влияние обмоток одного стержня на обмотки других стержней весьма незначительно, особенно в тех случаях, когда для снижения высоты трансформатора применяют бронестержневую разветвленную конструкцию магнитопровода.

24.9. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Преобразование переменного напряжения, его повышение или понижение во многих случаях более экономично может быть осуществлено путем применения автотрансформатора. В отличие от трансформатора в автотрансформаторе для преобразования напряжения используется не только магнитная связь обмоток, но и их прямое или встречное последовательное соединение. Принципиальные схемы однофазного автотрансформатора и соединения его первичных и вторичных обмоток показаны на рис. 24.11. В случаях рис. 24.11, *а* и *б* в процессе преобразования напряжение повышается: $U'>U$; в случаях рис. 24.11, *в* и *г* — понижается: $U'<U$, где U и U' — напряжение питающей сети и нагрузки.

В силовых автотрансформаторах обычно применяются схемы с прямым включением обмоток по рис. 24.11, *а* и *г*. Схемы с обратным включением обмоток по рис. 24.11, *б* и *в* используются только при регулировании напряжения путем реверсирования регулировочной обмотки.

На преобразование напряжения при помощи автотрансформатора затрачивается меньше активных материалов, чем на такое же преобразование, осуществляемое при помощи трансформатора. Это снижает также потери мощности, связанные с процессом преобразования. По расходу активных материалов и снижению потерь применение автотрансформатора тем выгоднее, чем меньше напряжение U' отличается от напряжения U. При расчете двухобмоточного автотрансформатора следует исходить из его расчетной мощности $S_р = U_1I_1 = U_2I_2$, отнесенной к одной фазе. Например, в случае если требуется повысить (или понизить) напряжение в 2 ра-

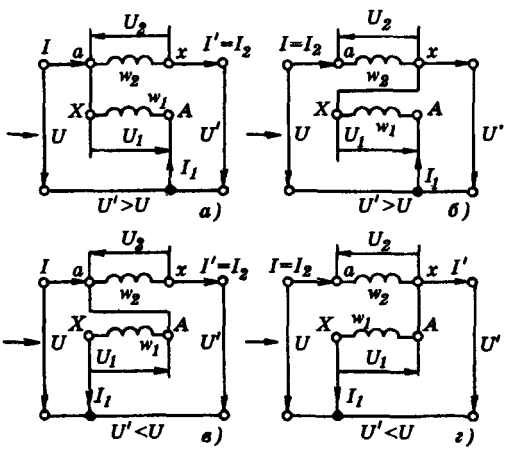


Рис. 24.11. Различные схемы включения автотрансформатора

за, расчетная мощность автотрансформатора должна быть равна половине его номинальной мощности.

При расчете трехобмоточного автотрансформатора следует исходить из условий его работы (повышение или понижение напряжения) и мощностей отдельных обмоток $S_1 = U_1I_1$, $S_2 = U_2I_2$, $S_3 = U_3I_3$.

В этом случае расчетная типовая мощность одной фазы автотрансформатора будет равна

$$S_p = (S_1+S_2+S_3)/2.$$

Класс изоляции первичной обмотки определяется номинальным напряжением U_1. Класс изоляции вторичной обмотки устанавливается по номинальному значению напряжения U, если $U>U'$, или напряжения U', если $U'>U$. В трехфазных автотрансформаторах класс изоляции выбирается по соответствующим значениям линейных напряжений.

Основное преимущество автотрансформатора перед трансформатором — его меньшая стоимость — сказывается тем сильнее, чем ближе отношение U'/U к единице.

Основным недостатком автотрансформатора, вытекающим из наличия электрической связи его обмоток, является возможность появления высокого напряжения на стороне НН.

Силовые автотрансформаторы получили широкое применение для связи сетей близких напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и т. п. В этих случаях они выполняются на значительные мощности нагрузки, доходящие до 500 МВ·А и выше. Мощные автотрансформаторы изготавливаются как в однофазном, так и в трехфазном исполнении. В автотрансформаторах, предназначенных для трехфазных сетей, помимо двух основных обмоток, имеющих автотрансформаторную связь и соединенных по схеме звезды с заземленной нейтралью, предусматриваются дополнительные обмотки, обычно низшего напряжения, соединенные треугольником. Наличие таких обмоток приводит к выравниванию фазных напряженнй при несимметричной нагрузке, а также устраняет появление в фазных напряжениях основных обмоток ЭДС тройной частоты. Номинальная мощность обмотки НН составляет от 20 до 50% номинальной (проходной) мощности автотрансформатора. Расчет нагрузочных режимов и режимов короткого замыкания трех- и четырехобмоточных трансформаторов, имеющих две обмотки, соединенные по схеме автотрансформатора, может быть проведен на основе общей теорин многообмоточных трансформаторов.

Наиболее широкое применение в сетях высокого напряжения получили трехобмоточные автотрансформаторы, у которых обмотки ВН и СН соедннены последовательно (в звезду) и образуют автотрансформатор, а обмотка НН, соединенная в треугольник, не имеет электрической связи с двумя другими обмотками.

Автотрансформаторы находят также применение в электрических установках, когда требуется длительно или временно повышать или понижать напряжение в отдельных точках сетн до 2 раз, например для снижения пусковых токов при пуске двигателей большой мощности или при регулировании режимов специальных электрометаллургических печей, а также в разнообразных устройствах радиосвязи, проводной и электронной техники.

24.10. РЕГУЛИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В соответствии с ГОСТ 11677-85 и стандартами на трансформаторы различных классов напряжений и диапазонов мощностей большинство силовых масляных трансформаторов допускают регулнрование, т. е. изменение в соответствии с заданным режимом, или стабилизацию напряжения на одной или двух обмотках. Как правило, регулирование напряжения осуществляется путем переключения ответвлений обмотки посредством переключателя. Различают трансформаторы, переключаемые без возбуждения (ПБВ) и регулируемые под нагрузкой (РПН). Переключение без возбуждения допускается только в том случае, когда все обмотки трансформатора на время переключения отключаются от сети. Оно осуществляется путем перестановки вручную переключателя ответвлений посредством рукоятки, выведенной на крышку бака, или при помощи установленного на трансформаторе привода с дистанционным управлением. Регулирование под нагрузкой осуществляется на возбужденном и нагруженном трансформаторе без перерыва нагрузки и без отключения трансформатора от сети при автоматическом или ручном дистанционном управлении устройством регулирования напряжения под нагрузкой.

В трансформаторах с ПБВ напряжение регулируется ступенями $\pm 2\times 2{,}5\%$, т. е. 95; 97,5; 100; 102,5 и 105% номинального значения. В трансформаторах РПН регулирование осуществляется в пределах $\pm(9\div 16)\%$ при числе ступеней в положительном и отрицательном направлениях по 6, 8, 9 н 10. Трансформаторы РПН значительно дороже эквивалентных по мощности и другим параметрам трансформаторов ПБВ. Например, масляный трансформатор мощностью 1000 кВ·А с РПН в 2,95 раза дороже трансформатора с ПБВ.

Сухие трансформаторы мощностью от 160 до 1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ выпускаются с ПБВ и регулированием на обмотке ВН четырьмя ступенями (кроме номинального напряжения) $\pm 2\times 2{,}5\%$ номинального напряжения обмотки. Регулирование осуществляется путем перестановки контактных пластин на панели переключения.

Наибольшее распространение имеют системы с РПН, применяемые в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ·А. Основные виды регуляторов типа РПН показаны на рис. 24.12. Регулировочная обмотка в таких трансформаторах обычно выполняется в виде отдельного концентра, как правило внешнего, для облегчения подвода регулировочных ответвлений к переключающему устройству.

С увеличеннем напряжения н мощностн трансформаторов эффективность использования системы

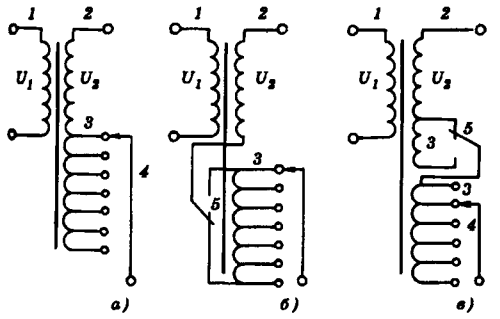


Рис. 24.12. Схемы регулирования типа РПН

а — без реверсирования регулировочной обмотки; *б* — с реверсированием; *в* — со ступенью грубой регулировки; *1* — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка; *3* — регулировочная обмотка с ответвлениями; *4* — переключающее устройство; *5* — предыбиратель

РПН увеличивается. При этом широко применяются отдельные регулировочные автотрансформаторы.

Основные трудности использования чисто механических систем РПН связаны с проблемой износостойкости контактов. Одним из радикальных решений этой проблемы является сочетание тиристорных и механических систем регулирования, обеспечивающих переключение регулировочных обмоток трансформатора, и использование систем бесконтактного регулирования напряжения.

Системы плавного бесконтактного регулирования напряжений структурно представляют собой подмагничиваемые автотрансформаторы или трансформаторы и автотрансформаторы или трансформаторы, снабженные специальной системой коммутации обмоток мощными полупроводниковыми приборами.

В настоящее время имеется большое количество схемно-конструктивных решений трансформаторно-полупроводниковых регуляторов — стабилизаторов напряжения, которые можно отнести к следующим типам:

1) плавно регулируемые трансформаторы с подмагничиванием, в которых регулирование выходного напряжения основано на принципе изменения магнитного потока, сцепленного со вторичной обмоткой (ТРМК, АТРМК — трансформаторы и автотрансформаторы, регулируемые магнитной коммутацией), или перераспределением напряжения между имеющимися двумя группами первичных и вторичных обмоток (ТРПН, АТРПН — трансформаторы и автотрансформаторы, регулируемые перераспределением напряжения);

2) регулируемые трансформаторы дискретного типа, имеющие большое число ответвлений, коммутируемых электронными или релейнымн ключами;

3) трансформаторы с плавным регулированием коэффициента трансформации за счет одно- или многократного переключения в пределах полупериода питающего напряжения регулировочных ответвлений обмоток.

Современные конструкции ТРМК работают по принципу изменения магнитного потока, сцепленного со вторичной обмоткой, которая значительно удалена от первичной обмотки. В трансформаторах имеются обмотки подмагничивания, размещенные на специальных элементах магнитной системы, которые в зависимости от тока нагрузки и подмагничивания в разной степени шунтируют главный магнитный поток, изменяя магнитную связь между первичной и вторичной обмотками. Основная конструкция АТРМК показана на рис. 24.13. Буквой w с индексами обозначены силовые обмотки и обмотки управления. Устройства такого типа получили распространение в качестве регуляторов-стабилизаторов напряжения с широкими пределами регулирования. Серия таких трансформаторов имеет широкое распространение в диапазоне мощностей 25÷250 кВ·А.

В случае необходимости стабилизации сетевого напряжения в относительно узком диапазоне рационально использование трансформаторов с перераспределением напряжения. Принципиальная конструктивная схема АТРПН показана на рис. 24.14. Фактически АТРПН представляет собой совмещенные в одной конструкции последовательно включенные повышающий и понижающий автотрансформаторы, работающие попеременно в пределах полупериода сетевого напряжения, управление которыми осуществляется обмотками подмагничивания. При сведении к нулю интервала работы повышающего автотрансформатора выходное напряжение меньше входного, коэффициент трансформации (передачи) меньше 1. При сведении к нулю интервала работы понижающего автотрансформатора выходное напряжение больше входного, коэффициент

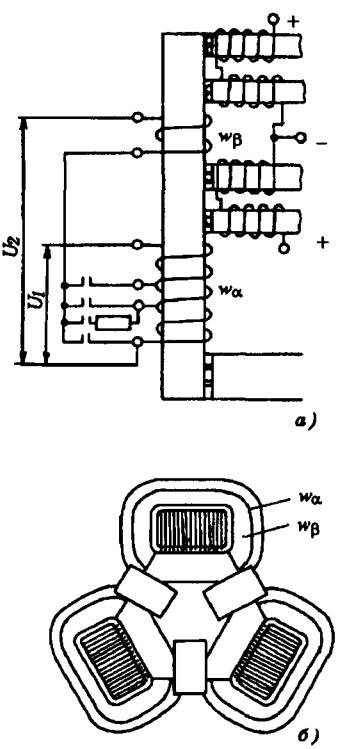


Рис. 24.13. Принципиальная конструктивная схема одной фазы симметричного АТРМК (*а*) и его вид сверху (*б*)

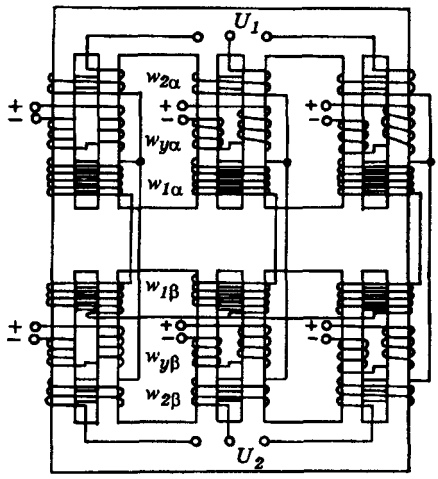


Рис. 24.14. Принципиальная конструктивная схема АТРПН

трансформации больше 1. Изменяя соотношение между длительностями работы каждого из автотрансформаторов в пределах полупериода можно регулировать выходное напряжение в заданных пределах или стабилизировать его при изменении напряжения в сети. На данном принципе основана работа стабилизаторов серии СТС

В системах дискретного типа (рис. 24.15) регулирование напряжения достигается за счет ступенчатого переключения по двоичному коду последовательно соединенных секций обмоток. Переключение осуществляется в момент перехода тока через нулевое значение. Регуляторы такого типа не искажают выходное напряжение.

Среди многообразия систем плавного фазового регулирования коэффициента трансформации наиболее рациональными являются устройства, в которых отвод нижней ступени регулирования соединяется с нагрузкой через индуктивность или емкость (рис. 24.16), причем коммутаторы включаются как

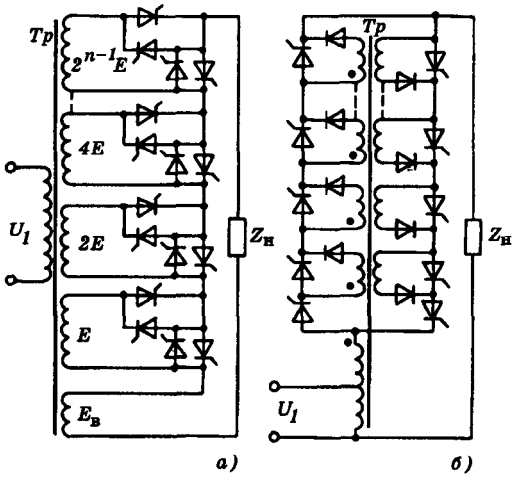


Рис. 24.15. Регулируемый трансформатор (*а*) и автотрансформатор (*б*) дискретного типа

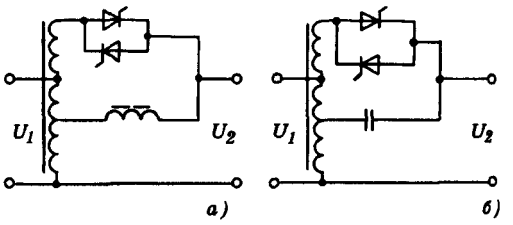


Рис. 24.16. Регуляторы с использованием индуктивности (*а*) и емкости (*б*) для подключения нижней ступени регулирования

на входе, так и на выходе трансформатора. Схема силовой части стабилизаторов напряжения серии СТНП представлена на рис. 24.17. Работа схемы стабилизации основана на однократном в пределах полупериода питающего напряжения изменении момента переключения регулировочных ответвлений обмоток. При мощности нагрузки до 25 кВ А стабилизаторы реализованы по схеме рис. 24.17, при нагрузках 40÷100 кВ·А — по схеме рис. 24.18.

Трехфазный стабилизатор получается соединением в звезду трех однофазных по схеме рис. 24.19 Для одновременного регулирования или стабилизации фазных и линейных напряжений на выходе включен симметрирующий трансформатор, устраняющий смещение нейтрали и выполненный по схеме звезда—треугольник Стабилизаторы серии СТНП имеют сниженные массогабаритные показатели, коэффициент нелинейных искажений менее 3% и быстродействие 0,04 с.

Система регулирования по схеме рис. 24.20 может использоваться для трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А при напряжении ВН до 10 кВ. При этом конструкция трансформатора не претерпевает каких-либо существенных изменений, за исключением сведения к минимуму индуктивности рассеяния регулировочной обмотки. Переключение регулировочных отводов осуществляется поочередным отпиранием тиристоров T_1 и T_2, коммутируемых по принципу параллельного инвертора, при этом возможно многократное в пределах полупериода переключение обмоток, а выходное напряжение, представленное на рис. 24.21, легко фильтруется. Схема с двумя последовательно включенными автотрансформаторами также представлена на рис. 24.21.

В табл. 24.1 и 24.2 представлены основные данные и характеристики стабилизаторов.

24.11. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Применяемые в настоящее время системы охлаждения трансформаторов и их условные обозначения приведены в табл. 24.3.

Сухие трансформаторы применяются при мощностях 1600÷2500 кВ·А, напряжении до 20 кВ и устанавливаются в помещениях с относительной влажностью воздуха до 80%.

Трансформаторы с охлаждением типа М применяются до мощности 6300 кВ·А. Система охлажде-

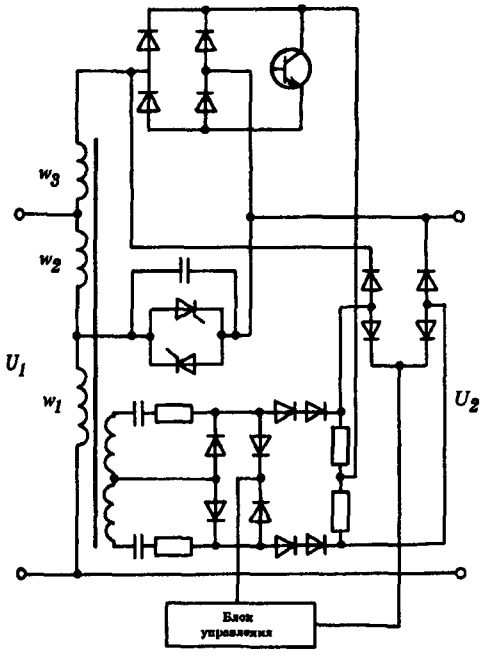


Рис. 24.17. Основные элементы схемы однофазного стабилизатора напряжения с емкостным выходным фильтром

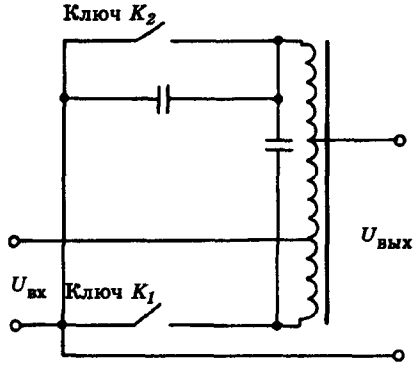


Рис. 24.18. Структура трансформаторно-емкостного регулятора напряжения параллельного типа

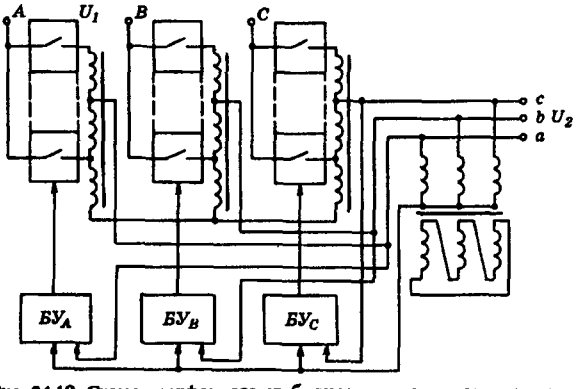


Рис. 24.19. Схема трехфазного стабилизатора напряжения с выходным симметрирующим трансформатором ($БУ_A$, $БУ_B$, $БУ_C$ — блоки управления фаз)

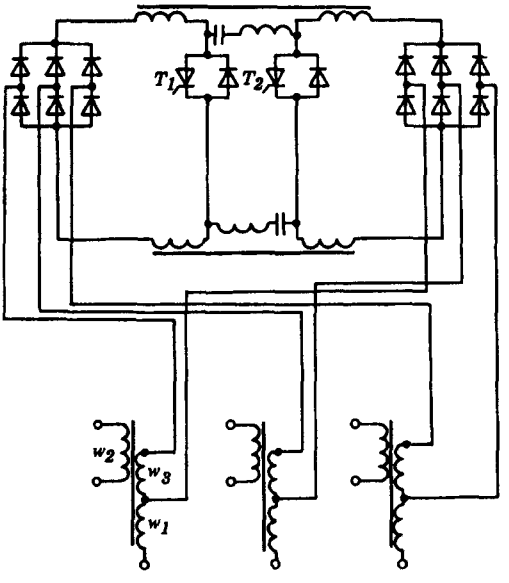


Рис. 24.20. Трехфазный трансформатор с высокочастотным коммутатором в нейтрали обмоткн ВН

ния типа Д применяется в трансформаторах мощностью 10 000÷80 000 кВ·А, она допускает длительную работу с отключенными вентиляторами при нагрузке менее 50% номинальной. Системы охлаждения типов ДЦ и НДЦ применяются для силовых трансформаторов общего назначения мощностью 80 000÷400 000 кВ·А, каждый охладитель такой системы может рассеивать мощность до 200 кВт. Водяные охладители систем Ц и НЦ компактнее воздушных и рассеивают мощности до 1000 кВт.

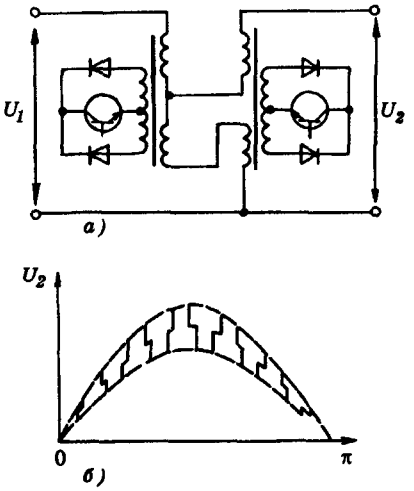


Рис. 24.21. Регулятор с многократным переключением обмоток за полупериод переменного напряжения (*а*) и кривая его выходного напряжения (*б*)

Таблица 24.1. Основные параметры стабилизаторов СТС-2М

Тип	Входное номинальное напряжение, В	Выходное номинальное напряжение, В	Пределы изменения напряжения, %	Номинальная мощность, кВ·А	Время восстановления выходного напряжения при скачкообразном изменении напряжения сети от 0,85 до 1,1 $U_{ном}$, с	КПД, %	Коэффициент мощности	Масса, кг
СТС-2М-10/0,5	220 380	220 380	—	10	0,2	95,5		125
СТС-2М-16/0,5	220 380	220 380	+10 —	16	0,3	96,5		165
СТС-2М-25/0,5	220 380	220 380	—15 —	25	0,35	96,5		235
СТС-2М-40/0,5	220 380	220 380	—	40	0,4	97,0	0,93	283
СТС-2М-63/0,5	220 380	220 380	—	63	0,4	97,5		425
СТС-2М-100/0,5	220 380	220 380	—	100	0,4	98,0		525

Примечания: 1. Стабилизация выходного напряжения осуществляется по действующему значению с точностью ±1% номинального линейного или фазного напряжения при одновременном воздействии следующих дестабилизирующих факторов: отклонении напряжения питающей сети от +10 до —15% номинального, колебании тока симметричной нагрузки от 0 до его номинального значения; изменении коэффициента мощности нагрузки от 1 до 0,7 (индуктивной), отклонении частоты тока в сети ±3% номинального значения.

2. При дополнительном воздействии дестабилизирующих факторов вместе с перечисленными выше стабилизация должна осуществляться с точностью: ±2% при несимметрии токов нагрузки по фазам до 100%, ±3% при несимметрии напряжения сети до 10%.

3. Электрическая схема обладает высокой термостабильностью, что позволяет использовать стабилизаторы в условиях районов с холодным климатом и влажных тропиков.

Таблица 24.2. Основные параметры стабилизаторов СТС-3 и СТНП

Тип	Номинальная мощность, кВ·А	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	КПД, %	Масса, кг	Быстродействие, мс
СТС-3, СТС-3У	10, 16, 25, 40, 63, 100	380 (—20% ÷ +15%)	Фазное 220 ±1% Линейное 380 ±1%	96÷98	165÷525	200—400
СТНП	10, 16, 25	380 (—17,5% ÷ +12,5%)	Фазное 127 ±1%; 220 ±1% Линейное 220 ±1%, 380 ±1%	98	220÷350	40

Таблица 24.3. Системы охлаждения трансформаторов и их условные обозначения

Система охлаждения	Условное обозначение	Система охлаждения	Условное обозначение
Сухие трансформаторы		*Масляные трансформаторы*	
Естественное воздушное при открытом исполнении	С	Естественная циркуляция воздуха и масла	М
Естественное воздушное при защищенном исполнении	СЗ	Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д
Естественное воздушное при герметичном исполнении	СГ	Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла	МЦ
Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха	СД	Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла	НМЦ

Окончание табл. 24.3

Система охлаждения	Условное обозначение	Система охлаждения	Условное обозначенне
Масляные трансформаторы		*Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком*	
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ	Естественная негорючим жидким диэлектриком	Н
Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла	НДЦ	Негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха	НД
Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла	Ц	Негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика	ННД
Принудительная циркуляцня воды и масла с направленным потоком масла	НЦ		

24.12. НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Нагрузочной способностью называется совокупность допустимых нагрузок и перегрузок трансформатора. Исходным режимом для определения нагрузочной способности является номинальный режим работы трансформатора на основном ответвлении при номинальных условиях места установки и охлаждающей среды, определяемых соответствующим стандартом или техническими условиями.

Допустимым режимом нагрузки называется режим продолжительной нагрузки трансформатора, при котором расчетный износ изоляции обмоток от нагрева не превышает износа, соответствующего номинальному режиму работы.

Перегрузочным считается такой режим, при котором расчетный износ изоляции превосходит износ, соответствующий номинальному режиму работы.

Основаниями для ограниченных во времени нагрузок, в том числе и выше номинальной, является неполная нагрузка трансформатора в период, предшествующий допустимой нагрузке, и пониженная температура охлаждающей среды (воздуха или воды).

ГОСТ 14209-84 дает возможность лучшего использования систем охлаждения, рациональной загрузки силовых трансформаторов и оптимального выбора мощностей трансформаторов при проектировании подстанций.

24.13. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Электротехнические предприятия выпускают большое количество трансформаторов, предназначенных для работы в самых разнообразных областях промышленности и техники и отличающихся условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. Для установления единых требований к трансформаторам, отражающих условия их работы в процессе эксплуатации, а также характеристики современного состояния и возможностей трансформаторостроения, имеется ряд государственных и межгосударственных (включающих страны СНГ) стандартов.

Перечень стандартов приведен ниже. Следует заметить, что некоторые стандарты на момент создания справочника окончательно не согласованы, поэтому указаны действующие на этот период стандарты.

Для отличия по конструктивным признакам, назначению, мощности и напряжению все трансформаторы подразделяются на типы, которым присваивается условное обозначение.

Буквы в обозначенни типа трансформатора означают:

А — автотрансформатор (трансформатор обозначения не имеет);

О или Т — однофазный или трехфазный трансформатор;

Р — наличие расщепленной обмотки НН;

Т — трансформатор трехобмоточный (двухобмоточный обозначения не имеет);

Н — трансформатор с устройством переключения регулировочных ответвлений под нагрузкой РПН (устройство ПБВ не обозначается).

В числителе дроби после буквенного обозначення типа указывается номинальная мощность трансформатора в киловольт-амперах (кВ·А), в знаменателе — класс напряжения обмотки ВН в киловольтах (кВ).

Следует учесть, что перечень буквенного обозначения типов трансформаторов далеко не полон, особенно это касается специальных трансформаторов и трансформаторов малой мощности, номенклатура которых весьма широка. При затруднениях в расшифровке буквенного обозначения следует обратиться к стандартам или техническим условиям на конкретные виды трансформаторов.

Силовые трансформаторы в зависимости от мощности и класса напряжения подразделяются на восемь габаритов:

I габарит включает трансформаторы мощностью до 100 кВ·А классов напряжения до 35 кВ;

II — от 100 до 1000 кВ·А напряжением до 35 кВ;

III — от 1000 до 6300 кВ·А напряжением до 35 кВ;

IV — свыше 6300 кВ·А напряжением до 35 кВ;

V — до 32 000 кВ·А напряжением до 110 кВ;

VI — свыше 32 000 до 80 000 кВ·А напряжением до 330 кВ;

VII — свыше 80 000 до 200 000 кВ·А напряжением до 330 кВ;

VIII — свыше 200 000 кВ·А напряжением более 330 кВ.

Масляные трансформаторы мощностью до 1,6 мВ·А включительно выпускаются в баках с охладительными трубами (рис. 24.22) или с прямо-

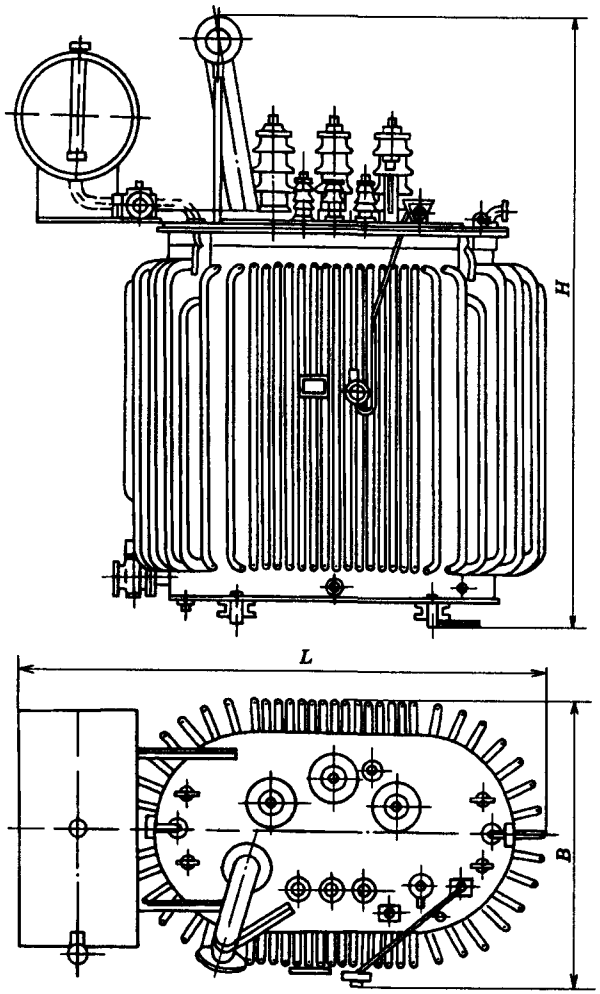


Рис. 24.22. Габаритные размеры трансформаторов мощностью до 1600 кВ · А; ВН до 35 кВ

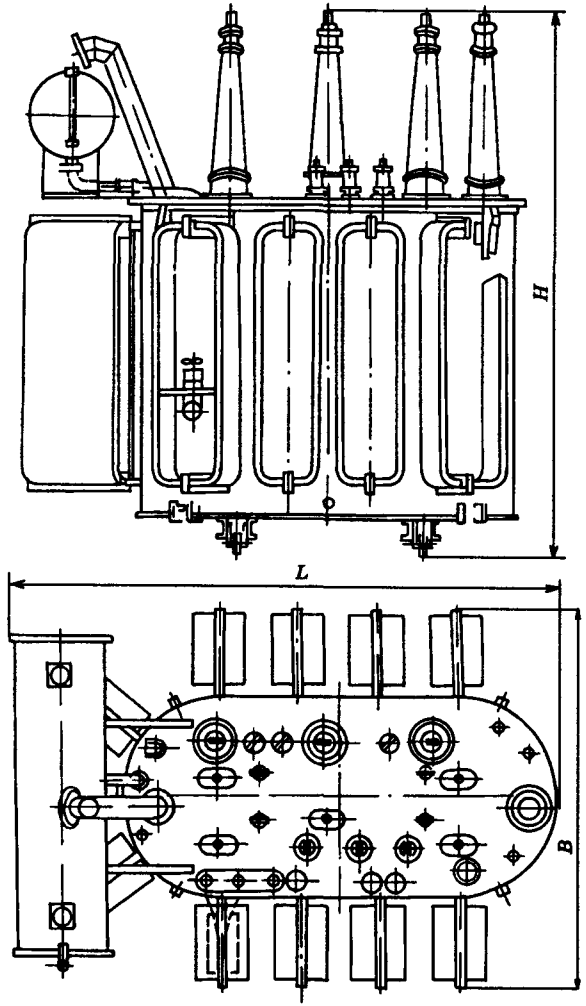


Рис. 24.23. Габаритные размеры трансформаторов мощностью от 2500 до 100 000 кВ · А; ВН 110÷220 кВ

трубными радиаторами, приваренными к баку, или навесными. В трансформаторах мощностью 10 мВ·А (рис. 24.23) и выше применяют масляное охлаждение с дутьем (Д), когда навесные радиаторы баков обдуваются установленными на них вентиляторами. При выключенных вентиляторах трансформатор может нести нагрузку до 50% номинальной. Для дальнейшей интенсификации теплоотдачи применяется циркуляционное охлаждение, когда масло откачивается из бака насосами и охлаждается в воздушном (охлаждение типа ДЦ) или водяном (Ц) охладителе.

При мощностях 10 мВ·А и выше большинство трансформаторов общего назначения имеют баки с нижним разъемом; бак состоит из двух частей: нижней (высота 300÷500 мм), на которой устанавливается активная часть, и верхней, которая может быть снята при осмотре или ремонте активной части без ее подъема.

Большинство масляных трансформаторов для регулирования напряжения обмоток имеют ответвления на обмотках ВН и (или) СН для переключения без возбуждения (ПБВ) или регулирования под нагрузкой (РПН). У трансформаторов ПБВ управление переключателями выведено на крышку трансформатора или на ручной привод снаружи бака. Аппаратура РПН размещается в баке трансформатора; управление переключающими устройствами дис-

Таблица 24.4. Трансформаторы трехфазные силовые масляные общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжение до 35 кВ включительно

а) Основные параметры

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Потери, Вт		$u_к$, %	i_0, %
		ВН	НН		$P_х$	$P_к$		
ТМ	25	6 или 10	0,4	$У/У_н$-0 $У/Z_н$-11	130	600 690	4,5 4,7	3,2
ТМ	40	6 или 10	0,4	$У/У_н$-0 $У/Z_н$-11	175	880 1000	4,5 4,7	3,0
ТМ	63	6 или 10	0,4	$У/У_н$-0 $У/Z_н$-11	240	1280 1470	4,5 4,7	2,8
ТМ	100	6 или 10	0,4	$У/У_н$-0 $У/Z_н$-11	330	1970 2270	4,5 4,7	2,6
		35	0,4	$У/У_н$-0 $У/Z_н$-11	420	1970 2270	6,5 6,8	
ТМ	160	6 или 10	0,4 0,69 0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $У/Z_н$-11	510	2650 3100 3100	4,5 4,5 4,7	2,4
		35	0,4 0,69 0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $У/Z_н$-11	620	2650 3100 3100	6,5 6,5 6,8	
ТМ	250	6 или 10	0,4 0,69 0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $У/Z_н$-11	740	3700 4200 4200	4,5 4,5 4,7	2,3
		35	0,4 0,69 0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $У/Z_н$-11	900	3700 4200 4200	6,5 6,5 6,8	
ТМ, ТМН	400	6 или 10	0,4 0,4 0,69	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $Д/У_н$-11	950	5500 5900 5900	4,5	2,1
		35	0,4 0,69	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	1200	5500 5900	6,5	
ТМ, ТМН	630	6 или 10	0,4 0,4 0,69	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11 $Д/У_н$-11	1310	7600 8500 8500	5,5	2,0
		35	0,4 0,69	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	1600	7600 8500	6,5	
ТМН			6,3 11	$У/Д$-11 $У/Д$-11		7600 8500		

Примечания: 1. Вид переключения ответвлений: для трансформаторов мощностью от 25 до 250 кВ·А — диапазон ±5% ступенями по 2,5%, ПБВ; для трансформаторов мощностью 400 и 630 кВ·А — ПБВ и РПН; для трансформаторов мощностью 630 кВ·А класса напряжения 35 кВ с обмотками НН 6,3 и 11 кВ — РПН.

2. Возможно изготовление трансформаторов с ПБВ мощностью от 25 до 400 кВ·А напряжением обмоток НН 0,23 кВ со схемой и группой соединения обмоток $У/У_н$-0, а также трансформаторов с ПБВ мощностью от 100 до 630 кВ·А.

3. Трансформаторы с РПН мощностью 400 и 630 кВ·А напряжением обмоток НН 0,4 и 0,69 кВ устанавливаются с потерями короткого замыкания на 10% большими, чем указано в табл. 24.4.

Окончание табл. 24.4

б) Массогабаритные показатели

Номинальная мощность, кВ · А	Верхний предел напряжения обмоток ВН, кВ	Габаритные размеры, мм			Полная масса, кг
		H	*L*	*B*	
25	10	1225	1120	460	380
40		1270	1120	480	485
63		1400	1120	560 (680)	600 (620)
100		1470	1200	800 (850)	720 (740)
160		1600	1220	1020	1100 (1150)
250		1760	1310 (1550)	1050	1425 (1475)
400		1900	1400 (1720)	1080	1900
630		2150	1750	1275	3000
100	35	2200	1330	900	1300
160		2260	1400	1000	1700
250		2320	1500	1250	2000
400		2500	1650	1350	2700
630		2750	2100	1450	3500

Примечания: 1. Для трансформаторов с РПН, а также трансформаторов с усиленными вводами допускается увеличение габаритных размеров и массы по сравнению с приведенными в таблице.

2. Габаритные размеры и массы, указанные в скобках, относятся к трансформаторам со схемой и группой соединения обмоток $У/Z_н$-11.

3. Для трансформаторов с установленным газовым реле допускается увеличение габаритных размеров по длине и высоте на 200 мм.

танционное и автоматизированное, но возможно и без использования автоматики. При дистанционном управлении для перевода с одной ступени на другую, соседнюю, требуется около 3 с.

Нейтраль обмоток трансформаторов с напряжением 6, 10 и 35 кВ изолирована от земли, обмоток с напряжениями 110÷750 кВ заземлена наглухо.

Технические данные силовых масляных трансформаторов общего назначения приведены в табл. 24.4—24.12. Для трехобмоточных трансформаторов потери короткого замыкания $P_к$ даны максимальные для одного из трех сочетаний обмоток ВН—НН, ВН—СН, СН—НН. Напряжение короткого замыкания $u_к$, %, дано на средней ступени регулирования при номинальной мощности трансформатора.

Широкое развитие электротермии в промышленности требует выпуска электрооборудования для

Таблица 24.5. **Трансформаторы общего назначения двухобмоточные классов напряжения до 35 кВ по ГОСТ 11920-85**

Тип трансформатора	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и количество ступеней регулирования напряжения на стороне ВН
	ВН	НН		
ТМ-1000/10	6; 10	0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	ПБВ, ±2×2,5%
		0,69	$Д/У_н$-11	
		3,15; 6,3	$У/Д$-11	
	10	10,5	$У/Д$-11	
ТМ-1000/35	13,8 15,75	0,4 0,69	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	
	20	6,3; 10,5	$У/Д$-11	
	35	3,15; 6,3; 10,5	$У/Д$-11	
ТМН-1000/35	20	0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	РПН, ±4×2,5% или ±6×1,5%
		0,69	$Д/У_н$-11	
		6,3; 11	$У/Д$-11	
	35	0,4; 0,69	$У/У_н$-0	
		6,3; 11	$У/Д$-11	
ТМ-1600/10	6; 10	0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	ПБВ, ±2×2,5%
		0,69	$Д/У_н$-11	
		3,15; 6,3	$У/Д$-11	

Продолжение табл. 24.5

Тип трансформатора	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и количество ступеней регулирования напряжения на стороне ВН
	ВН	НН		
ТМ-1600/35	20	0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	ПБВ, ±2×2,5%
		0,69	$Д/У_н$-11	
		6,3; 10,5	У/Д-11	
	35	0,40; 0,69	$У/У_н$-0	
		3,15; 6,3; 10,5	У/Д-11	
ТМН-1600/35	13,8; 15,75	0,4	$Д/У_н$-11	РПН, ±4×2,5% или ±6×1,5%
		11	У/Д-11	
	20	0,4	$У/У_н$-0 $Д/У_н$-11	
		0,69	$Д/У_н$-11	
		6,3; 11	У/Д-11	
	35	0,4, 0,69	$У/У_н$-0	
		6,3; 11	У/Д-11	
ТМ-2500/10	6	0,4; 0,69	$Д/У_н$-11	ПБВ, ±2×2,5%
	10	3,15	У/Д-11	
	6	6,3; 10,5		
ТМШ-2500/10	6	6,3	У/Д-11	
ТМ-2500/35	20	0,69	$Д/У_н$-11	
	35	3,15	У/Д-11	
	20; 35	6,3; 10,5		
ТМН-2500/35	13,8; 15,75	6,3; 11	У/Д-11	РПН, ±4×2,5% или ±6×1,5%
	20	0,69	$Д/У_н$-11	
	35	0,69	$У/У_н$-0	
		6,3	У/Д-11	
	20; 35	11		
ТМ-4000/10	6; 10	3,15	У/Д-11	ПБВ, ±2×2,5%
	10	6,3		
ТМШ-4000/10	6	6,3		
ТМ-4000/35	35	3,15		
	20; 35	6,3; 10,5		
ТМН-4000/35	13,8; 15,75; 20; 35	6,3; 11		РПН, ±4×2,5% или ±6×1,5%
ТМ-6300/10	10	3,15; 6,3; 10,5		ПБВ, ±2×2,5%
ТМШ-6300/10	6	6,3	Д/Д-0	
ТМ-6300/35	35	3,15	У/Д-11	
	20; 35	6,3; 10,5		
ТМН-6300/20	13,8; 15,75; 20	6,3; 11		РПН, ±4×2,5% или ±6×1,5%
ТМН-6300/35	35			
ТД-10000/35	38,5	6,3; 10,5		ПБВ, ±2×2,5%
ТД-16000/35				
ТДЦ-80000/35	15,75		Д/Д-0	Без регулирования

Таблица 24.6. Трансформаторы двухобмоточные для собственных нужд электростанций напряжением до 35 кВ по ГОСТ 11920-85

Тип трансформатора	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения на стороне ВН
	ВН	НН		
ТМС-1000/10	3,15; 10,5	0,4	$У/У_н$-0	ПБВ ±2×2,5%
	6,3		$У/У_н$-0; $Д/У_н$-11	
ТМНС-6300/10	10,5	6,3	$У_н/Д$-11	РПН ±8×1,25%
ТДНС-1000/35	10,5; 13,8	6,3	$У_н/Д$-11; $У_н/У$-0	РПН ±8×1,5%
	15,75	6,3	$У_н/У$-0	
	18; 36,75	10,5	$У_н/Д$-11	
	10,5; 36,75	3,15	$У_н/У$-0; $У_н/Д$-11	
	13,8; 15,75; 18		$У_н/У$-0	
ТДНС-16000/20	10,5; 13,8	6,3	$У_н/Д$-11; $У_н/У$-0	
	15,75; 18	6,3; 10,5	$У_н/У$-0; $У_н/Д$-11	
ТДНС-16000/35	36,75			
ТРДНС-25000/15	10,5	6,3-6,3	Д/Д—Д—0—0	
	15,75	6,3-6,3; 10,5-6,3; 10,5-10,5		
ТРДНС-25000/35	36,75	6,3-6,3; 6,3-10,5	$У_н/Д$—Д—11—11	
ТРДНС-32000/15	15,75	10,5-10,5	Д/Д—Д—0—0	
ТРДНС-32000/35	15,75; 18; 20; 24	6,3-6,3; 6,3-10,5; 10,5-10,5	Д/Д—Д—0—0	
	36,75		$У_н/Д$—Д—11—11 Д/Д—Д—0—0	
ТРДНС-40000/20	15,75; 18; 20	6,3-6,3; 6,3-10,5; 10,5-10,5	Д/Д—Д—0—0	
ТРДНС-40000/35	24; 36,75		$У_н/Д$—Д—11—11 Д/Д—Д—0—0	
ТРДНС-63000/35	20; 24	6,3-6,3; 6,3-10,5	Д/Д—Д—0—0	
	36,75	6,3-6,3; 6,3-10,5; 10,5-10,5	$У_н/Д$—Д—11—11 Д/Д—Д—0—0	

Таблица 24.7. Трансформаторы трехобмоточные класса напряжения 35 кВ

Тип трансформатора	Напряжение, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения на стороне ВН
	ВН	СН	НН		
ТМТН-6300/35	35	10,5; 13,8; 15,75	6,3	$У_н/Д$—Д—11	РПН ±6×1,5%
ТДТН-10000/35	36,75				РПН ±8×1,5%
ТДТН-16000/35					

Примечания: 1. Каждая обмотка рассчитана на полную номинальную мощность трансформатора.

2. Обмотка ВН — наружная; обмотки СН и НН могут меняться местами. Для трансформатора мощностью 6300 кВ·А расположенне обмоток относительно стержня следующее: СН—ВН—НН.

Таблица 24.8. Параметры и массогабаритные показатели трансформаторов напряженнем до 35 кВ

а) Двухобмоточные трансформаторы общего назначения

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %	i_0, %	Габаритные размеры, мм			Масса, т	
	$P_х$	$P_к$			H	L	B	полная	масла
ТМ-1000/35	2,0	12,2 (11,6)	6,5	1,4	3600	3700	1550	7,0	1,65
ТМН-1000/35	2,1	12,2 (11,6)	6,5	1,4	3600	3700	1550	7,0	1,65

Окончание табл. 24.8

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %	i_0, %	Габаритные размеры, мм			Масса, т	
	$P_х$	$P_к$			H	L	B	полная	масла
ТМ-1600/35	2,75	18,0 (16,5)	6,5	1,3	3000	2700	2100	4,85	1,18
ТМН-1600/35	2,9	18,0 (16,5)	6,5	1,3	3650	3700	1550	8,0	2,85
ТМШ-2500/10	3,85	23,5	6,5	1,0	3600	3500	2260	6,8	2,3
ТМ-2500/35	3,9	23,5	6,5	1,0	3300	3250	2200	9,0	2,15
ТМН-2500/35	3,9	23,5	6,5	1,0	3750	3700	2250	10,0	3,6
ТМ-4000/10	5,2	33,5	7,5	0,9	3900	3900	3650	8,65	3,8
ТМШ-4000/10	5,2	33,5	7,5	0,9	3900	3900	3650	8,65	3,8
ТМН-4000/20	5,6	33,5	7,5	0,9	3800	4020	3350	12,9	3,98
ТМ-4000/35	5,3	33,5	7,5	0,9	3300	3300	2250	9000	2150
ТМН-4000/35	5,6	33,5	7,5	0,9	3300	3300	2250	9000	2150
ТМ-6300/10	7,4								
ТМШ-6300/10	7,4								
ТМ-6300/35	7,6	46,5	7,5	0,8	3950	3750	2400	12,2	2,85
ТМН-6300/20	8,0								
ТМН-6300/35	8,0								
ТДЦ-80000/15	58	280	10	0,45	5970	4700	4700	75	1,1

Примечания: 1. Значения параметров трансформаторов, не указанных в таблице, устанавливаются по результатам приемочных испытаний.

2. Указанные в скобках значения потерь короткого замыкания соответствуют напряжениям обмотки НН 10,5 и 11,0 кВ.

3. Указанные для трансформатора ТМ-2500/35 потери холостого хода соответствуют напряжению обмотки НН 10,5 кВ; для трансформатора ТМН-2500/35 — 11,0 кВ.

б) Двухобмоточные трансформаторы для собственных нужд электростанций

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %	i_0, %	Габаритные размеры, мм			Масса, т	
	$P_х$	$P_к$			H	L	B	полная	масла
ТМС-1000/10	2,2	12,2	8	1,4	2700	2450	1150	3,8	1
ТМНС-6300/10	8	46,5		0,8	4200	4125	3610	18,2	5
ТДНС-10000/35	12	81	14	0,75	5000	5400	2980	28,8	8,3
		60	8		4880	4500	3150	23	7,3
ТДНС-16000/20	17	85	10	0,7	5250	6100	3080	35	10,5
ТДНС-16000/35					5250	6100	3080	38	10,5
ТРДНС-25000/15; ТРДНС-25000/35	25	115	ВН—($НН_1$+$НН_2$)—10,5; ВН—$НН_1$ или ВН—$НН_2$—19; $НН_1$—$НН_2$ — не менее 30	0,65	5350	6600	4300	55	16
ТРДНС-32000/15; ТРДНС-32000/35	29	145	ВН—($НН_1$+$НН_2$)—12,7; ВН—$НН_1$ или ВН—$НН_2$—23; $НН_1$—$НН_2$ — не менее 40	0,6	5350	6600	4300	61	15,5
ТРДНС-40000/35	36	170		0,50	5500	6800	4500	70	18,5
ТРДНС-63000/35	50	250		0,45	6100	7000	4600	91	23

в) Параметры и массогабаритные показатели трехобмоточных трансформаторов

Тип трансформатора	Потери, кВт		Напряжение КЗ, %, для обмоток			i_0, %	Размеры, мм			Масса, т	
	$P_х$	$P_к$	ВН—НН	ВН—СН	СН—НН		H	L	B	полная	масла
ТМТН-6300/35	—	55	7,5	7,5	16	—	—	—	—	—	—
ТДТН-10000/35	—	75	8,0	16,5	7	—	—	—	—	—	—
ТДТН-16000/35	—	115	8,0	16,5	7	—	—	—	—	—	—

Примечание. Значения параметров трансформатора, не указанные в таблице, устанавливаются по результатам приемочных испытаний.

Таблица 24.9. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ, соответствующие ГОСТ 12965-85

а) Двухобмоточные трансформаторы с ПБВ и без ответвлений на напряжение 110 кВ

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	ВН	НН		
ТМ-2500/110 ТМ-4000/110 ТМ-6300/110 ТД-10000/110 ТД-16000/110 ТД-25000/110 ТД-32000/110 ТД-40000/110	121	6,3; 10,5	$У_н/Д-11$	ПБВ на стороне ВН, ±2×2,5%
ТДЦ-80000/110		3,15; 6,3; 10,5; 13,8		
ТДЦ-125000/110		10,5; 13,8		Без регулирования
ТДЦ-200000/110		13,8; 15,75; 18		
ТДЦ-250000/110		15,75		
ТДЦ-400000/110		20		

б) Двухобмоточные трансформаторы с РПН на напряжение 110 кВ

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	ВН	НН		
ТМН-2500/110	110	6,6; 11	$У_н/Д-11$	РПН на стороне НН, +15%, +10 ступеней; —12%, —8 ступеней
ТМН-6300/110	115	6,6; 11; 16,5		РПН в нейтрали ВН, ±16%; ±9 ступеней
ТДН-10000/110 ТДН-16000/110		6,6; 11; 16,5; 22; 34,5		
ТДН-25000/110 ТДН-40000/110		38,5		
ТРДН-25000/110 ТРДНС-25000/110 ТРДН-40000/110 ТРДНС-40000/110 ТРДН-63000/110 ТРДНС-63000/110		6,6-6,6; 11-11; 11-6,6	$У_н/Д-Д-11-11$	
ТРДН-80000/110		6,3-10,5; 6,3-6,3; 10,5-10,5		
ТДН-63000/110 ТДН-80000/110		38,5	$У_н/Д-11$	
ТРДЦН-125000/110		10,5-10,5	$У_н/Д-Д-11-11$	

в) Трехобмоточные трансформаторы с РПН на напряжение 110 кВ

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	ВН	СН	НН		
ТМТН-6300/110	115	16,5; 22; 38,5	6,6; 11	$У_н/Д/Д-11-11$ $У_н/У_н/Д-0-11$	РПН в нейтрали ВН, ±16%, ±9 ступеней, ПБВ на стороне СН — 38,5 и 34,5 кВ ±(2×2,5%)
ТДТН-10000/110		16,5; 22; 34,5; 38,5		$У_н/Д/Д-11-11$ $У_н/У_н/Д-0-11$	
ТДТНШ-10000/110		11	11	$У_н/Д/Д-11-11$	
		6,3	6,6		
ТДТН-16000/110		22	6,6; 11		

Окончание табл. 24.9

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	ВН	СН	НН		
ТДТН-16000/110	115	34,5 38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	РПН в нейтрали ВН, ±16%, ±9 ступеней, ПБВ на стороне СН — 38,5 и 34,5 кВ ±(2×2,5%)
ТДТНШ-16000/110		11	11	$У_н/Д/Д$—11—11	
		6,3	6,6		
ТДТН-25000/110		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
		22	6,6; 11		
		34,5; 38,5		$У_н/У_н/Д$—0—11	
ТДТНШ-25000/110		11	11	$У_н/Д/Д$—11—11	
		6,3	6,6		
ТДТН-40000/110		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
		22	6,6; 11		
		34,5; 38,5		$У_н/У_н/Д$—0—11	
ТДТНШ-40000/110		11	11	$У_н/Д$—$Д$—11—11	
		6,3	6,6		
ТДТН-63000/110		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
		38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	
ТДТН-80000/110		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
		38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	
ТДЦТН-80000/110		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
		38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	

Примечание. В обозначениях типов трансформаторов буква Ш означает, что данные трансформаторы предназначены для электроснабжения угольных шахт с раздельным питанием подземных и наземных токоприемников.

г) Трансформаторы двух- и трехобмоточные класса напряжения 150 кВ с РПН

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ			Схема и группа соединения обмоток	Вид, диапазон и число ступеней регулирования напряжения
	ВН	СН	НН		
ТМН-6300/150	158	—	6,6; 11	$У_н/Д$—11	РПН в нейтрали ВН, ±12%, не менее ±8 ступеней
ТДН-16000/150					
ТРДН-32000/150			6,3—6,3; 10,5—10,5; 6,3—10,5	$У_н/Д$—$Д$—11—11	
ТРДНС-32000/150					
ТРДН-63000/150					
ТРДНС-63000/150					
ТДЦ-125000/150	165	—	10,5; 13,8	$У_н/Д$—11	Без ответвлений
ТДЦ-250000/150			10,5; 13,8; 15,75; 18		
ТЦ-250000/150			13,8		
ТДЦ-400000/150			20,0		
ТДТН-16000/150	158	38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	РПН в нейтрали ВН, ±12%, не менее ±8 ступеней ПБВ на стороне СН — 38,5 кВ ±(2×2,5%)
ТДТН-25000/150					
ТДТН-40000/150		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	
ТДТН-63000/150		38,5	6,6; 11	$У_н/У_н/Д$—0—11	
		11	6,6	$У_н/Д/Д$—11—11	

Примечание. В трехобмоточных трансформаторах все обмотки рассчитаны на номинальную мощность трансформатора.

Таблица 24.10. Параметры холостого хода, короткого замыкания и массогабаритные показатели двухобмоточных трансформаторов 110, 150 кВ с РПН, соответствующие ГОСТ 12965-85

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %			i_0, %	Масса, т		Габаритные размеры, м		
	$P_х$	$P_к$	ВН—НН	ВН—$НН_1(НН_2)$	$НН_1—НН_2$, не менее		полная	масла	H	L	B
ТМН-2500/110	5,5	22	10,5	—	—	1,5	18,5	6,65	4,1	4,2	2,6
ТМН-6300/110	10	44	10,5	—	—	1	28,4	10,5	5,0	5,8	4,2
ТДН-10000/110	14	58	10,5	—	—	0,9	31	10,2	5,3	5,8	3,5
ТДН-16000/110	18	85	10,5	—	—	0,7	41,5	12,82	5,5	6,0	3,5
ТДН-25000/110	25	120	10,5	—	—	0,65	52	15	5,4	5,9	4,6
ТРДН-25000/110				20	30						
ТДН-40000/110	34	170	10,5	—	—	0,55	68	17,6	5,7	6,0	4,7
ТРДН-40000/110				20	30						
ТДН-63000/110	50	245	10,5	—	—	0,50	87,5	22	6,2	6,7	5,2
ТРДН-63000/110				20	30						
ТДН-80000/110	58	310	10,5	—	—	0,45	105	24	6,8	7,4	5,3
ТРДН-80000/110				20	30						
ТРДЦН-125000/110	105	400	11	21	30	0,55	160	32,7	7,3	8,3	3,2

Примечание. Значения параметров трансформаторов, не указанные в таблицах, устанавливаются по результатам приемочных испытаний.

Таблица 24.11. Трансформаторы силовые масляные общего назначения, соответствующие ГОСТ 17544-85

а) Двухобмоточные классов напряжения 220, 330, 500 кВ

Тип трансформатора	Номинальная мощность, МВ·А	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмотки	Вид переключения ответвлений, диапазон и число ступеней
		ВН	НН или $НН_1—НН_2$		
ТД-80000/220	80	242	6,3; 10,5; 13,8	$У_н/Д—11$	ПБВ на стороне ВН, ±2×2,5%
ТДЦ-125000/220	125		10,5; 13,8		
ТЦ-160000/220	160		13,8; 15,75		Без регулирования
ТДЦ-200000/220	200		13,8; 15,75; 18		ПБВ на стороне ВН, ±2×2,5%
ТЦ-200000/220	200		13,8; 15,75; 18		Без регулирования
ТДЦ-250000/220	250		13,8; 15,75		
ТЦ-250000/220	250		13,8; 15,75		
ТДЦ-125000/330	125	347	10,5; 13,8		
ТДЦ-200000/330	200		13,8; 15,75; 18		
ТЦ-200000/330	200		13,8; 15,75; 18		
ТДЦ-250000/330	250		13,8; 15,75		
ТДЦ-400000/330	400		20		
ТЦ-400000/330	400		15,75; 20		
ТДЦ-250000/500	250	525	13,8; 15,75; 20		
ТЦ-250000/500	250		13,8; 15,75		
ТДЦ-400000/500	400		13,8; 15,75; 20		
ТЦ-400000/500	400		15,75; 20		
ТЦ-630000/500	630		15,75; 20; 24; 36,75		
ТЦ-1000000/500	1000		24		

Продолжение табл. 24.11

б) Двухобмоточные классов напряжения 220, 330 кВ с РПН

Тип трансформатора	Номинальная мощность, МВ·А	Напряжение, кВ		Схема и группа соединения	Вид, диапазон, число ступеней регулирования
		ВН	$НН_1$—$НН_2$		
ТРДН-32000/220	32	230	6,3-6,3; 6,6-6,6; 11,0-11,0; 11,0-6,6	$У_н/Д$—$Д$—11—11	В нейтрали ВН, ±12%,; ±12 ступеней
ТРДНС-40000/220	40		6,3-6,3; 6,6-6,6; 11,0-11,0		
ТРДН-63000/220	63		11,0-11,0		
ТРДЦН-63000/220	63		11,0-6,6		
ТРДЦН-100000/220	100		11,0-11,0		
ТРДЦН-160000/220	160		11,0-11,0		
ТРДЦН-200000/220	200		11,0-11,0		
ТРДЦНС-400000/330	400	330	6,3-6,3; 10,5-10,5; 10,5-6,3		В нейтрали ВН, ±12%; ±8 ступеней
ТРДЦН-630000/330	630		6,3-6,3; 10,5-10,5; 10,5-6,3		

в) Трехобмоточные класса напряжения 220 кВ с РПН

Тип трансформатора	Номинальная мощность, мВ·А	Напряжение, кВ			Схема и группа соединения	Вид, диапазон, число ступеней регулирования
		ВН	СН	НН		
ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6	$У_н/У_н/Д$—0—11	РПН, в нейтрали ВН, ±12%; ±12 ступеней; ПБВ, СН, ±2×2,5%
ТДТН-40000/220	40			11,0		
ТДТН-63000/220	63			11,0		

г) Трехфазные трехобмоточные автотрансформаторы классов напряжения 220, 330 и 500 кВ с РПН

Тип трансформатора	Номинальная мощность, мВ·А		Напряжение, кВ			Схема и группа соединения
	Автотрансформатор	Обмотка НН	ВН	СН	НН	
АТДЦТН-63000/220/110	63	32	230	121	6,6; 11; 38,5	$У_{н.авто}/Д$—0—11
АТДЦТН-125000/220/110	125	63			6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5	
АТДЦТН-200000/220/110	200	80			6,3; 6,6; 38,5; 10,5; 11	
АТДЦТН-250000/220/110	250	125			6,3; 6,6; 38,5	
		100			10,5; 11	
АТДЦТН-125000/330/110	125	63	330	115	6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5	
АТДЦТН-200000/330/110	200	80		115	6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5	
АТДЦТН-250000/330/110	250	100		158	10,5; 38,5	
АТДЦТН-250000/500/110	250	100	500	121	10,5; 38,61	

Примечание. Для трансформаторов АТДЦТН-63000/220 и АТДЦТН-125000/220 регулирование напряжения осуществляется в линии СН в диапазоне ±12% (±8 ступеней); для трансформатора АТДЦТН-250000/500 — в нейтрали ВН в диапазоне от —11,8 до +11% (±8 ступеней); для остальных — в линии СН в диапазоне ±12% (±6 ступеней).

Окончание табл. 24.1

д) Однофазные трехобмоточные автотрансформаторы классов напряжения 330, 500 и 750 кВ с РПН

Тип трансформатора	Номинальная мощность, мВ·А		Напряжение, кВ			Схема и группа соединения
	Автотрансформатор	Обмотка НН	ВН	СН	НН	
АОДЦТН-133000/330/220	133	50	$\frac{330}{\sqrt{3}}$	$\frac{230}{\sqrt{3}}$	15,75; 20	$I_{авто}/I$—0—0
		67				
		33			10,5; 38,5	
АОДЦТН-267000/500/220	267	67	$\frac{500}{\sqrt{3}}$	$\frac{230}{\sqrt{3}}$	10,5; 13,8; 38,5	
		83			15,75	
		120			20	
АОДЦТН-267000/750/220	267	80	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	$\frac{230}{\sqrt{3}}$	10,5	
АОДЦТН-333000/750/330	333	120		$\frac{330}{\sqrt{3}}$	15,75; 10,5	

Примечания: 1. При работе в трехобмоточном режиме допускается нагрузка на стороне НН 33 мВ·А при $\cos\varphi_{нн}$ = и 9 мВ·А при $\cos\varphi_{нн} = 0{,}8$.

2. Регулирование напряжения осуществляется для автотрансформатора АОДЦТН-133000/330/220 в линии СН в диапазоне ±12% (±6 ступеней); для автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 в линии СН в диапазоне ±12% (±8 ступеней); для автотрансформатора АОДЦТН-267000/750/220 в нейтрали ВН от —11,8 до +11,5% (±8 ступеней), для АОДЦТН-267000/750/330 в нейтрали ВН от —12,2 до +9,9% (±20 ступеней).

Таблица 24.12. Основные параметры трансформаторов, соответствующих ГОСТ 17544-85

а) Двухобмоточные классов напряжения 220, 330, 500 кВ с ПБВ

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %	i_0, %	Масса, т		Габариты, мм		
	$P_х$	$P_к$			полная	масла	H	L	B
ТД-80000/220	79	315	11	0,45	160	45	5450	6350	4450
ТДЦ-125000/220	120	380	11	0,55	175	35	7650	7700	4500
ТДЦ-200000/220	130	660	11	0,4	215	46	7550	12 600	5600
ТЦ-200000/220							7550	11 250	4100
ТДЦ-250000/220	207	600	11	0,5	250	42	8800	11 400	4200
ТЦ-250000/220							8800	10 550	3350
ТДЦ-125000/330	125	380	11	0,55	165	32	8700	10 500	5350
ТДЦ-200000/330	180	520	11	0,55	215	40	9000	10 500	5250
ТЦ-200000/330						42	9000	10 500	4100
ТДЦ-250000/330	214	605	11	0,5	250	43	9100	11 150	5800
ТЦ-250000/330						44	9100	11 150	4300
ТДЦ-250000/500	205	590	13	0,45	275	51	9850	11 150	5350
ТЦ-250000/500							9850	11 150	5350
ТДЦ-400000/500	315	790	13	0,45	355	62	9950	11 150	6200
ТЦ-400000/500						65	9950	11 150	6200

б) Двухобмоточные трансформаторы классов напряжения 220, 330 кВ с РПН

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %			i_0, %	Масса, т		Габариты, мм		
	$P_х$	$P_к$	ВН—НН	ВН—$НН_1$	$НН_1$—$НН_2$, не менее		полная	масла	H	L	B
ТРДН-32000/220	45	150	11,5	21	28	0,65	110	30	7850	8400	5350
ТРДНС-40000/220	50	170	11,5	21	28	0,6	105	27	7300	8150	5300
ТРДН-63000/220	70	265	11,5	21	28	0,6	150	39	8120	9200	5700
ТРДЦН-63000/220							140	39	8150	8800	5350

Окончание табл. 24.12

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %			i_0, %	Масса, т		Габариты, мм		
	$P_х$	$P_к$	ВН—НН	ВН—$НН_1$	$НН_1$—$НН_2$ не менее		полная	масла	H	L	B
ТРДЦН-100000/220	102	340	12,5	23	28	0,65	165	44	8000	9450	4200
ТРДЦН-160000/220	155	500	12,5	23	28	0,6	240	56	7600	12550	5500
ТРДЦН-63000/330	100	260	11,0	18,5	28	0,8	175	51	8850	11050	5400

в) Трехобмоточные класса напряжения 220 кВ с РПН

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %			i_0, %	Масса, т		Габариты, мм		
	$P_х$	$P_к$	ВН—НН	ВН—$НН_1$	$НН_1$—$НН_2$, не менее		полиая	масла	H	L	B
ТДТН-25000/220	45	130	12,5	20,0	6,5	0,9	120	40	8050	9600	5150
ТДТН-40000/220	54	220	12,5	22,0	9,5	0,55	110	31	7350	9000	5350

г) Автотрансформаторы трехобмоточные класса напряжения 220, 330, 500 кВ с РПН

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_к$, %			i_0, %	Масса, т		Габариты, мм		
	$P_х$	$P_к$	ВН—СН	ВН—$НН_1$	$СН_1$—$НН_2$, не менее		полная	масла	H	L	B
АТДЦТН-63000/220/110	37	200	11,0	35	22	0,45	130	47	7300	9750	5250
АТДЦТН-125000/220/110	65	315		45	28	0,4	160	58	7150	11 300	5150
АТДЦТН-200000/220/110	105	430		32	20	0,45	215	59	7800	12 000	5300
АТДЦТН-250000/220/110	120	500		32	20	0,24	260	84	8350	12 700	4650
АТДЦТН-125000/330/110	100	345	10,0	35	24	0,45	245	78	9250	12 150	5600
АТДЦТН-200000/330/110	155	560	10,5	38	25	0,45	290	80	9500	14 000	6000
АТДЦТН-250000/330/110	160	620	10,5	54	42	0,45	300	86	9450	13 400	5700
АТДЦТН-250000/500/110	190	670	13,0	33	18,5	0,4	318	68	9850	12 950	7050

электрических промышленных печей, важнейшими элементами которого являются специальные электропечные трансформаторы и трансформаторные агрегаты. В зависимости от номинального вторичного напряжения и глубины его регулирования, а также числа фаз и способа регулирования напряжения электропечные трансформаторы делят на группы по назначению: для дуговых сталеплавильных электропечей, для ниндукционных электропечей, для руднотермических электропечей, для электропечей электрошлакового переплава н т. д. Основные характеристики электропечных трансформаторов представлены в табл. 24.13.

Буквенное обозначение электропечного трансформатора в основном соответствует обозначениям трансформаторов общего назначения с некоторыми

Таблица 24.13. Основные технические данные электропечных трансформаторов

а) Трехфазные и однофазные масляные трансформаторы классов напряжения 6 и 10 кВ внутренней установки для питания дуговых сталеплавильных печей с ПБВ (переключение дистанционное)

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ · А	Напряжение, В		Схема и группа соединения обмоток	Число ступеней регулирования	Масса, т
		ВН	НН			
ЭОМК-390/10	250	6 000	117,5÷95	*1/1—0*	3	2,6
ЭОМК-390/10	250	10 000	117,5÷95	*1/1—0*	3	2,6
ЭОМК-600/10	400	6 000	131÷102	*1/1—0*	3	3,22
ЭОМК-600/10	400	10 000	131÷102	*1/1—0*	3	3,22
ЭТДЦП-1600/10	800÷303	10 000	211,8÷80	*Д—У—Д—0—11*	12	8
ЭТДЦП-1600/10	800÷303	6 000	211,8÷80	*Д—У—Д—0—11*	12	8
ЭДЦП-2500/10	1600÷655	6 000	220÷90,2	*Д—У/Д—0—11*	12	11,5
АДЦП-2500/10	1600÷655	10 000	220÷90,2	*Д—У/Д—0—11*	12	11,5
ЭДЦП-4000/10	2500÷2250÷1305	6 000	220÷95,4	*Д—У/Д—0—11*	12	14,3
ЭДЦА-4000/10	2550÷2250÷1305	10 000	230÷95,4	*Д—У/Д—0—11*	12	14,3
ЭТЦПК-12500/10	8000÷3020	10 000	318÷120	*Д/Д—0; У/Д—11*	12	25

Продолжение табл. 24.13

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ · А	Напряжение, В		Схема и группа соединения обмоток	Число ступеней регулирования	Масса, т
		ВН	НН			
ЭТЦПК—12500/10	8000÷3020	6 000	318÷120	Д/Д—0; У/Д—11	12	25
ЭТЦП-10000/10	5600÷5000÷2887	10 000	260÷104	Д– У/Д—0—11	12	24
ЭТЦП-10000/10	5600÷5000÷2887	6 000	260÷104	Д—У/Д—0—11	12	24

б) Трехфазные и однофазные масляные трансформаторы классов напряжения 6 и 10 кВ внутренней установки для питания индукционных электропечей (переключение дистанционное)

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ · А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Вид переключения	Масса, т
		ВН	НН			
ЭОМПИ-1600/10	630÷168	6000	561÷118	11	ПБВ	4,8
ЭОМПИ-2000/10	1000÷2000	6000; 10 000	990÷177; 1980÷354	11	ПБВ	5,8
ЭОМПИ-1000/10	400÷76	6000; 6300; 10 000	510÷85	11	ПБВ	3,5
ЭОМПИ-1600/10	630÷110	10 000 6000	510÷79 511÷81	11	ПБВ	4,8
ЭОМНИ-4200/10	2500÷625	6000; 10 000	1459÷292	17	РПН	12,9
ЭТМП-1250/10	1000÷200	10 000 10 000 6000 6000	1020÷182; 510÷91 1020÷182; 510÷91	11	ПБВ	7,0
ЭТМНИ-2000/10	1600÷1600÷400	6000	1057÷211	17	РПН	13,3
ЭТЦНКИ-5000/10	2500÷625	6000; 10 000	2100÷420	17	РПН	15,2
ЭТЦНКИ-10000/10	5600÷1070	10 000; 6000	2400÷388	23	РПН	36,7
ЭТЦНКИ-12500/10	7100÷1350	6000; 10 000	2400÷380	23	РПН	40

в) Трансформаторы однофазные масляные 6 и 10 кВ внутренней установки для питания печей электрошлакового переплава (переключение дистанционное)

Тип трансформатора	Мощность, кВ · А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Вид переключения	Масса, т
		ВН	НН			
ЭОЦНШ-16000/10	7200÷7200÷2470	10 000	160÷41,6	90	РПН	34,2
ЭОМНШМ-1600/10	630÷630÷278	6000; 10 000	80÷28,5	90	РПН	10,33
ЭОДЦНШМ-2500/10	1000÷1000÷545	6000; 10 000	105÷37,8	90	РПН	13,0
ЭОДЦНШ-2500/10	1000÷1000÷551	10 000; 6000	394÷194	49	РПН	13,0
ЭОДЦНШМ-4000/10	1600÷1600÷680 1600÷1600÷733	6000 10 000	116÷32,4 116÷34,9	90	РПН	13,7
ЭОЦНШ-6300/10	3200÷1815 3200÷1555	10 000 6000	122÷51,7 122,4÷43,5	90	РПН	19,7
ЭОЦНШ-12500/10	5000÷2470 5000÷2450	10 000 6000	160÷41,6 160÷41,2	90	РПН	34,0

г) Одно- и трехфазные масляные трансформаторы класса напряжения 10 кВ внутренней установки для питания руднотермических электропечей (переключение автоматическое)

Тип трансформатора	Мощность, кВ · А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Вид переключения	Масса, т
		ВН	НН			
ЭОЦН-8200/10	4000 5500÷4500	10 000 10 000	408÷206 255÷162,5	17	РПН	19,0
ЭОДЦНА-10000/10	5500	10 000	493÷253	49	РПН	22,5

Продолжение табл. 24.13

Тип трансформатора	Мощность, кВ · А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Вид переключения	Масса, т
		ВН	НН			
ЭОЦНК-21000/10	8333÷7175	10 000	230÷140	23	РПН	47,0
ЭТЦНР-12500/10	6300÷6300÷5773	10 000 6000	479÷239 415÷206	17	РПН	32,0
ЭОЦНКР-5000/10	2500÷1690	$10\,000/\sqrt{3}$	94,6÷47,3	17	РПН	14,5
ЭТЦНКР-5000/10	2500÷1500	10 000; 6000	116÷49,7	17	РПН	25,0
ЭТМНР-2500/10	1500÷1094 1200÷1071	10 000 6000	73,7÷46,7 255÷144	9	РПН	12,5
ЭТМНКР-2500/10	1500÷1094 1200÷1071	10 000 6000	55,2÷31,3 191,1÷108,3	9	РПН	12,5
ЭТДЦПР-4000/10	2500÷1443	6000 10 000	399÷182,4 799,4÷329,7	12	ПБВ	14,4
ЭТМПКР-2500/10	1500÷783	10 000 6000	86,6÷45,2 85,5÷44,7	12	ПБВ	15,7
ЭТМПР-1000/10	630÷371	6000 10 000	312,1÷108,9 300÷105	12	ПБВ	8,74
ЭТЦНС-5000/10	2300÷1024	10 000 6000	103,7÷46,2 207,4÷92,4	17	РПН	22

д) Трансформаторы трехфазные классов напряжения 6, 10 и 0,5 кВ для питания электропечей постоянного тока

Тип трансформатора	Мощность, кВ · А	Напряжение обмоток, В			Схема и группа соединения	Число ступеней регулирования	Вид переключения	Масса, т
		Сетевая	Вентильная	Преобразовательный агрегат				
ТЦПУ-4000/10	1176÷482	10000 6000	240÷98,4	280,8	$Д/У_{нр}—У_{нр}—11—5$ $У/У_{нр}—У_{нр}—0—6$	12	ПБВ	12,2
	1674÷904	10000, 6000	236,8÷80,0	319,7	Д/ДД—0—0	12	ПБВ	14,21
ТРДЦП-5000/10	2575÷1305	10000 6000	260÷92,0	351,0	Д/ДД—0—0	12	ПБВ	14,33
ТРЦП-12500/10	5110÷2339	10000 6000	347÷136	468	Д/ДД—0—0	12	ПБВ	23,85
ТРСП-500/6	506	6000	91,1	123	У/ДУ—1—0	1	ПБВ	2,6
ТРСП-630/0,5	570	380	133,5	180	Д/ДД—0	2	ПБВ	2,72

в) Трансформаторы однофазные сухие класса напряжения 0,5 кВ для питания электропечей и установок электронагрева

Тип трансформатора	Мощность, кВ · А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Масса, т
		ВН	НН		
ОС-25/0,5	12,5÷8,34 20÷13,3	220 или 380	12,82÷6,41; 8,54÷42,7	4	136 155

Окончание табл. 24.13

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	Напряжение, В		Число ступеней регулирования	Масса, т
		ВН	НН		
ОС-63/0,5	50÷15	220 или 380	84,4÷25,3	10	330
		380	84,4÷12,65	20	
ОСЗ-100/0,5	80÷50	380	76÷47,5	10	905
ОСЗК-100/0,5	114÷71,3	380	38÷23,75	10	820
ОСЗК-250/0,5	250÷90,5	220 или 380	49,0÷4,6	12	499
ОСКР-320/0,5	250	380	42,2÷36,8÷32,6	3	1400

ж) Трансформаторы сухие трехфазные класса напряжения 0,5 кВ для питания электропечей и установок электронагрева

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	Напряжение, В		Схема и группа соединения обмоток	Число ступеней регулирования	Масса, кг
		ВН	НН			
ТС-63/0,5	40÷26,2	380 и 220	23,75÷4, 58	Д/Д—0 У/Д—11 У/У—0	12	311
ТСС-160/0,5	160÷69,3	380	42,4÷5,32	Д—У/У—Д	16	985
	160	380 ±5%	543,3	У/У—0	3	996
ТСС-400/0,5	345	380	63,6÷15,9 36,6÷9,165	У/У—0 У/Д—11	3	1600
	345	220	36,6÷9,165 63,6÷15,9	Д/Д—0 Д/У—11	3	1600
	187	220	20÷5 34,6÷8,65	Д/Д—0 Д/У—11	3	1600

з) Трансформаторы трехфазные преобразовательные класса напряжения 10,35 кВ для питания печей постоянного тока

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ·А	Напряжение, В		Схема и группа соединения обмоток	Вид переключения	Число ступеней регулирования	Масса, т
		Сетевая обмотка	Вторичная обмотка				
ТРДЦНГ-25000/35	11 000÷4644	35 000	450÷151	Д—У/ДД—0—0—11—11	РПН	22	55
ТРЦП-25000/10	11000÷5036	10 000	450,5÷153	Д—У/ДД—0—0—11—11	ПБВ	12	40

отличиями и дополнениями: в начале буквенного обозначения добавляется буква Э (электропечной); выполнение электропечного трансформатора в виде агрегата, состоящего из двух электромагнитных единиц или более, например трансформатор и реактор, обозначаются буквой К (комплект) в последней части буквенного обозначения; в конце буквенного обозначения указывают вид электрической печи, для питания которой предназначен данный трансформатор: И — индукционная, Ш — электрошлаковая, С — стекловарочная, Э — графитировочная для изготовления электродов, А — для производства абразивов; выполнение одной из обмоток с устройством ПБВ с дистанционным управлением обозначают дополнительной буквой П; в цифровой части условного обозначения указывается не номинальная, а типовая мощность электропечного трансформатора, которая определяет его габариты.

Для комплектования электроэнергетических систем на судах морского и речного флота выпускаются сухие трехфазные и однофазные трансформаторы напряжением до 660 В, частотой 50 (60) или 400 (500) Гц. Трансформаторы изготавливаются в открытом, каплезащищенном и водозащищенном

исполнениях мощностью от 0,063 до 25 кВ·А. Кроме питания электроустановок на судах трансформаторы могут использоваться для питания электрооборудования различных зданий и построек, станочного оборудования, систем освещения, бытовых электроприборов и т. п.

Применение влагостойких пропиточных лаков и покровных эмалей, вакуумная пропитка обмоток, изоляционных материалов повышенных классов нагревостойкости, использование холоднокатаной текстурованной электротехнической стали обеспечивает надежную работу трансформаторов в условиях повышенной вибрации и ударных сотрясений, в любых климатических условиях, в помещениях с повышенной влажностью и при температуре окружающего воздуха от —40 до +50 °С.

В табл. 24.14—24.17 приведены основные технические и массогабаритные данные этих трансформаторов (рис. 24.24—24.26).

В табл. 24.16 представлены данные трансформаторов типа ТСЛ, предназначенных для питания цепей управления и сигнализации лифтов

Таблица 24.14. Основные технические данные судовых трансформаторов

Мощность, кВ·А	Напряжение, В	
	Первичная обмотка	Вторичная обмотка при холостом ходе
	Однофазные	
0,063; 0,1; 0,25; 0,68; 1,0	660; 440; 415; 380; 240, 220 или 127	400; 230; 133; 115; 36; 28,5; 26 или 13
1,6; 2,5, 4,0; 6,3	660; 440; 415; 380; 220 или 127	400; 230; 133; 115; 36; 28,5 или 26
10; 16; 25	660; 440; 415; 380; 220 или 127	400; 230; 133 или 115
	Трехфазные	
0,63; 1,0; 1,6; 2,5	660; 440; 415; 380 или 220	400; 230; 133; 42; 36; 24 или 12
4,0; 6,3; 16	660; 440; 380 или 220	400; 230; 133 или 36
10; 25	660; 440; 380 или 220	400; 230 или 133

Таблица 24.15. Массогабаритные характеристики судовых трансформаторов

а) Однофазные трансформаторы в открытом исполнении (рис. 24.24), частота 50 Гц

Тип	Мощность, кВ·А	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
		L	*B*	*H*	
ОСМ-0,063-ОМ5	0,063	120	120	100	2,5
ОСМ-0,1-ОМ5	0,1	120	120	100	2,5
ОСМ-0,25-ОМ5	0,25 или 0,16	150	155	125	6,5
ОСМ-0,63-ОМ5	0,63 или 0,4	190	182	175	11,0
ОСМ-1,0-ОМ5	1,0	200	182	190	15,0

б) Водозащищенные одно- и трехфазные (рис. 24.25) трансформаторы, частота 50 Гц

Тип	Мощность, кВ·А	Число фаз	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
			L	*B*	H	
ОСВМ-0,25-ОМ5	0,25	1	270	245	168	9,0
ОСВМ-0,63-ОМ5	0,63	1	310	286	211	15,0
ОСВМ-1,0-ОМ5	1,0	1	340	310	234	19,0
ОСВМ-1,6-ОМ5	1,6	1	370	335	260	26,5
ТСВМ-1,6-ОМ5	1,6	3	390	364	260	30,5
ОСВМ-2,5-ОМ5	2,5	1	408	364	296	35,5
ТСВМ-2,5-ОМ5	2,5	3	420	394	260	40,0
ОСВМ-4,0-ОМ5	4,0	1	445	394	323	46,5
ТСВМ-4,0-ОМ5	4,0	3	460	434	296	53,5

в) Каплезащищенные одно и трехфазные (рис. 24.26) трансформаторы, частота 50 Гц

Тип	Мощность, кВ·А	Число фаз	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
			L	*B*	*H*	
ОСЗМ-6,3-ОМ5	6,3	1	465	335	455	66
ТСВМ-6,3-ОМ5	6,3	3	600	335	420	73
ОСЗМ-10-ОМ5	10	1	480	385	490	90

Продолжение табл. 24.15

в) Каплезащищенные одно и трехфазные (рис. 24.26) трансформаторы, частота 50 Гц

Тип	Мощность, кВ · А	Число фаз	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
			L	*B*	*H*	
ТСЗМ-10-ОМ5	10	3	600	335	465	99
ОСЗМ-16-ОМ5	16	1	526	463	555	133
ТСЗМ-16-ОМ5	16	3	638	385	490	145
ОСЗМ-25-ОМ5	25	1	526	463	580	173
ТСЗМ-25-ОМ5	25	3	706	463	555	200

г) Судовые трансформаторы на номинальную частоту 400 Гц

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВ · А	Номинальное напряжение, В		Масса, кг
		первичное	вторичное (при ХХ)	
		Открытые		
ОСМ-0,25	0,25	127 220 380	26÷28,5	2,2
		Водозащищенные		
ОСВМ-0,25	0,25	127	26÷28,5	4,1
		220	26÷28,5; 36; 133÷115; 230	
		380	26÷28,5; 133÷115; 230; 400	
		660	133÷115; 230; 400	
ОСВМ-0,63	0,63	220	26÷28,5; 36; 133÷115; 230	9,0
		380	26÷28,5; 133÷115; 230; 400	
		660	133÷115; 230; 400	
		Каплезащищенные		
ОСЗМ-16	16	220	133÷115	67
		380	133÷115; 230	
		660	230; 400	

Примечание. Водозащищенные трансформаторы выпускаются мощностью от 0,25 до 10 кВ · А с различными сочетаниями напряжений; каплезащищенные — от 16 до 40 кВ · А.

Окончание табл. 24.15

д) Судовые трехфазные трансформаторы на номинальную частоту 400 Гц

Тип	Номинальная мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, В		Схема и группа соединения обмоток	Масса, кг
		первичное	вторичное		
Водозащищенные					
ТСВМ-1,6-0,4-74.ОМ5	1,6	380÷220 380	230÷133 400	У—Д/$У_н$—Д—0—11—1—0 У/$У_н$—0	18
ТСВМ-2,5-0,4-74.ОМ5	2,5	200 380÷220 380 380	36 230÷133 36 400	Д/Д—0 У—Д/$У_н$—Д—0—11—1—0 У/Д—11 У/$Д_н$—0	18 24,5 24,5 24,5
Каплезащищенные					
ТСЗМ-16-0,4-74.ОМ5	16	380÷220 660 660÷380	230÷133 230÷133 400	У—Д/$У_н$—Д—0—11—1—0 У/У—Д—0—11 У—Д/$У_н$—0—1	73

Примечание. Водозащищенные трансформаторы выпускаются мощностью от 1,6 до 10 кВ·А; каплезащищенные — от 16 до 100 кВ·А.

Таблица 24.16. Трехфазные понижающие трансформаторы типа ТСЛ (номинальная частота питающей сети 50 Гц)

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	Напряжение, В		Размеры, мм					Масса, кг
		первичное	вторичное	*A*	A_1	*B*	*H*	*L*	
Рис. 24.27, а									
ТСЛ-0,1	0,1	220 или 380	95÷85; 22÷19; 230; 133; 42; 36; 27,5	120	82	110	120	155	4,0
ТСЛ-0,16	0,16			120	82	110	120	155	4,5
ТСЛ-0,25	0,25			120	82	115	125	155	5
Рис. 24.27, б									
ТСЛ-0,4	0,4	220 или 380	То же	140	90	145	160	225	10
ТСЛ-0,63	0,63			140	90	145	160	225	11
ТСЛ-1,0	1			140	90	160	180	260	15,5
ТСЛ-1,6	1,6			140	90	170	200	260	19

Таблица 24.17. Изолирующие трансформаторы серии ИОТ (рис. 24.28)

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	Номинальный ток, А		Размеры, мм			Масса, кг
		первичной обмотки	вторичной обмотки	*B*	*H*	*L*	
ИОТ-0,045	0,045	6,6 или 8,3	6,6	80	215	170	5,5
ИОТ-0,065	0,065	6,6 или 8,3	6,6	80	225	176	6
ИОТ-0,1	0,1	6,6 или 8,3	6,6	95	225	176	6,5
ИОТ-0,2	0,2	6,6 или 8,3	6,6	95	240	190	8,5
ИОТ-0,3	0,3	6,6 или 8,3	6,6	100	255	205	10
ИОТ-0,5	0,5	8,3	6,6	100	295	230	13

(рис. 24.27 *а*, *б*). Трансформаторы возможно использовать для питания выпрямительных схем управления, местного освещения и сигнализации, станочного оборудования, электроинструмента и автоматики.

В табл. 24.17 представлены параметры изолирующих трансформаторов серии ИОТ для питания аэродромных огней и разделения цепей высшего и низшего напряжений (рис. 24.28). Трансформаторы выпускаются мощностью от 0,045 до 0,5 кВ·А; трансформаторы загерметизированы резиновой оболочкой и предназначены для эксплуатации при

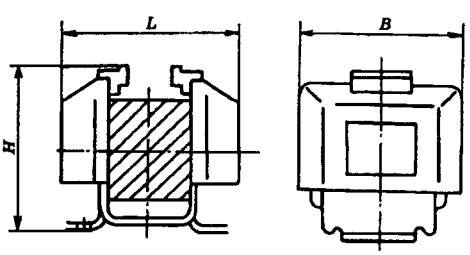


Рис. 24. 24. Однофазные сухие трансформаторы в открытом исполнении

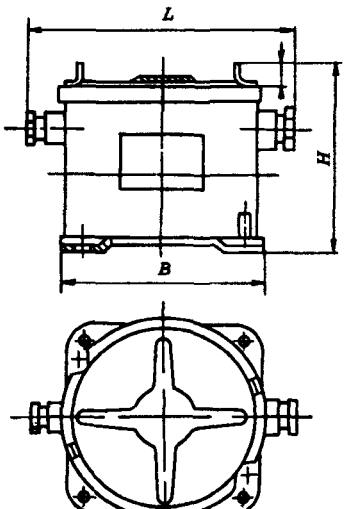


Рис. 24.25. Одно- и трехфазные трансформаторы в водозащищенном исполнении

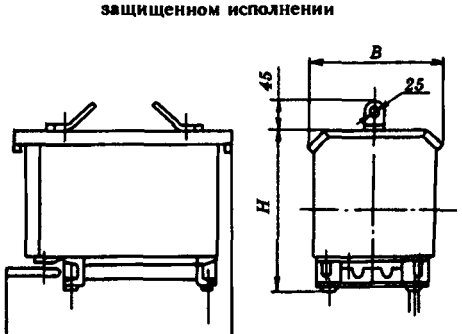


Рис. 24.26. Одно- и трехфазные трансформаторы в каплезащищенном исполнении

размещении в различных грунтах, воде, содержащейся в грунте, и бетонных колодцах. Трансформаторы стойки к воздействию минеральных масел, бензина и других агрессивных элементов, которые могут быть в почве.

Представленные в таблицах сведения о трансформаторах, их характеристиках, условиях работы и т. д. соответствуют в основном приведенным ниже стандартам:

ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения.

ГОСТ 1516.1-76 Электрооборудование переменного тока и напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.

ГОСТ 1516.2-76 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.

ГОСТ 9680-77Е Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и

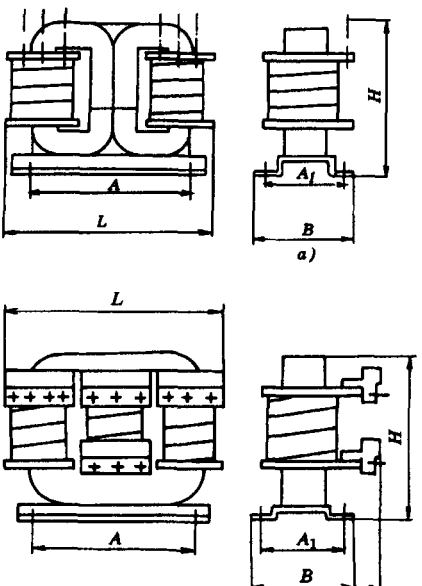


Рис. 24.27. Трехфазные трансформаторы для станочного и лифтового оборудования типа ТСЛ

а — мощностью 0,1÷0,25 кВ·А; *б* — мощностью 0,4÷1,6 кВ·А

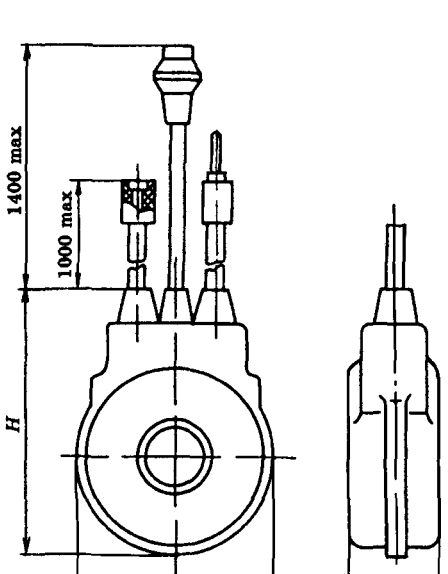


Рис. 24.28. Изолирующие трансформаторы

больше. Ряд номинальных мощностей.

ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.

ГОСТ 11920-85Е Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения до

	35 кВ включительно. Технические условия.
ГОСТ 12965-85Е	Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ. Технические условия.
ГОСТ 17544-85	Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. Технические условия.
ГОСТ 14209-85	Трансформаторы силовые общего назначения. Допустимые нагрузки.
ГОСТ 19294-84Е	Трансформаторы малой мощности общего назначения. Общие технические условия.
ГОСТ 27360-87	Трансформаторы силовые масляные герметизированные общего назначения мощностью до 1600 кВ·А напряжением до 22 кВ. Основные параметры и общие требования.
ГОСТ 3484-1.88	Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний.
ГОСТ 3484.2-88	Трансформаторы силовые. Испытания на нагрев.
ГОСТ 3484.3-88	Трансформаторы силовые. Методы измерений диэлектрических параметров изоляции.
ГОСТ 21023-75	Трансформаторы силовые. Методы измерений характеристик частичных разрядов при испытании напряжением промышленной частоты.
ГОСТ 22756-77	Трансформаторы (силовые и напряжения) и реакторы. Методы испытаний электрической прочности изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

24.1. **Петров Г.Н.** Электрические машины. Ч. 1. М.: Энергия, 1974.

24.2. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

24.3. **Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А.** Электрические машины. Трансформаторы. М.: Высшая школа, 1989.

24.4. **Каганович Е.А., Райхлин И.М.** Испытания трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А и напряжением до 35 кВ. М.: Энергия, 1980.

24.5. **Лейтес П.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергоиздат, 1981.

Раздел 25

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

СОДЕРЖАНИЕ

25.1. Определение электрической машины. Классификация по функциональному назначению 158
25.2. Разновидности электрических машин по характеру перемещения и форме подвижных частей 158
25.3. Электромеханическое преобразование энергии в электрической машине . . . 160
25.4. Способы получения периодического изменения магнитного поля в электрической машине 162
Цилиндрическая (барабанная) разноименнополюсная обмотка (162). Тороидальная разноименнополюсная обмотка (162). Кольцеобразная обмотка и когтеобразный сердечник (162). Кольцеобразная одноименная (униполярная) обмотка и зубчатый сердечник (163).
25.5. Возможные исполнения электрических машин и классификация по принципу действия 163
25.6. Классификация электрических машин по конструктивному исполнению, степени защиты и способу охлаждения . . . 165
25.7. Общие определения (по ГОСТ 183-74 и ГОСТ 17154-71) 168

25.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ НАЗНАЧЕНИЮ

Электрическая машина — основной преобразователь механической энергии в электрическую и электрической в механическую. От других электромеханических преобразователей электрические машины отличаются тем, что в них, за редким исключением, совершается однонаправленное непрерывное преобразование энергии.

По назначению электрические машины могут быть разделены на генераторы, служащие для преобразования механической энергии в электрическую; двигатели, используемые для преобразования электрической энергии в механическую; преобразователи, предназначенные для преобразования электрической энергии с одними параметрами (род тока, напряжение, частота, число фаз переменного тока) в электрическую энергию с другими параметрами.

Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах основано на явлении электромагнитной индукции и связано с электродвижущими силами (ЭДС), которые индуктируются в процессе периодического изменения магнитного поля, происходящем при механическом перемещении обмоток или элементов магнитопровода.

Электрические машины, действие которых основано на законе электромагнитной индукции, называются *индуктивными*. Возможно также создание электрических машин, в которых преобразование энергии основано на изменении электрического поля (*емкостные* машины), однако такие машины существенного практического распространения не имеют, поскольку по своим массогабаритным и стоимостным показателям редко могут конкурировать с индуктивными машинами.

Простейшим и наиболее распространенным индуктивным преобразователем, с помощью которого переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения, является трансформатор. Его обмотки и магнитопровод взаимно неподвижны, и процесс периодического изменения магнитного поля, в результате которого в обмотках индуктируется ЭДС, осуществляется в трансформаторе только за счет периодического изменения тока в обмотках.

Индуктивные преобразователи электрической энергии, в которых имеются движущиеся части, называются электромашинными преобразователями.

В зависимости от рода тока электрические машины разделяются на машины постоянного и переменного тока. Трансформатор и простейшая электрическая машина могут преобразовывать только электрическую энергию переменного тока, которая поступает из сети с переменным напряжением, изменяющимся с частотой f.

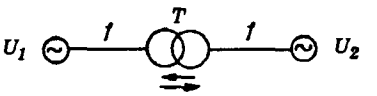
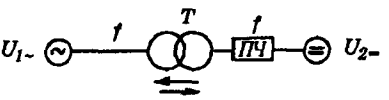
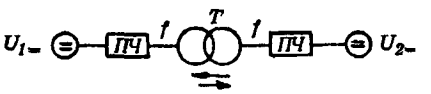
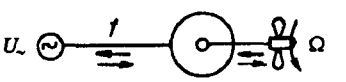
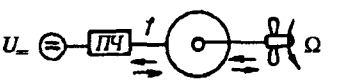
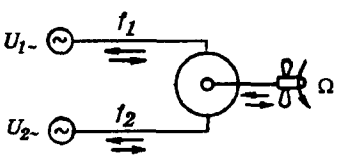
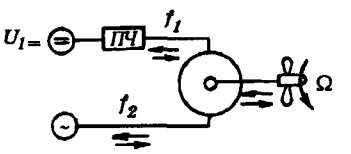
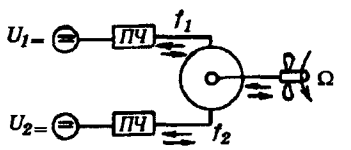
Для того чтобы преобразовать с помощью трансформатора или электрической машины электрическую энергию постоянного тока, нужно превратить ее с помощью преобразователя частоты (ПЧ) того или иного типа в электрическую энергию переменного тока. Такой преобразователь может быть полупроводниковым, а в электрических машинах — также и механическим (в виде коллектора, пластины которого соединены с катушками вращающейся обмотки, и неподвижных щеток, касающихся пластин).

Классификация индуктивных преобразователей энергии по функциональному назначению приводится в табл. 25.1.

25.2. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ФОРМЕ ПОДВИЖНЫХ ЧАСТЕЙ

Индуктивная электрическая машина состоит из двух основных частей: подвижной и неподвижной (рис. 25.1). Неподвижная часть — *статор*, состоит из сердечника той или иной конфигурации, одной или нескольких обмоток и конструктивных деталей, с помощью которых всем элементам статора придается определенное положение в пространстве.

Таблица 25.1

Наименование	Структурная схема	Функциональное назначение
Трансформатор T		Преобразование переменного тока одного напряжения U_1 в переменный ток другого напряжения U_2
Преобразователь переменного тока в постоянный (выпрямитель)		Преобразование переменного тока в постоянный (или обратное преобразование)
Преобразователь постоянного тока		Преобразователь постоянного тока одного напряжения $U_1=$ в постоянный ток другого напряжения $U_2=$
Электрическая машина переменного тока		Преобразование электрической энергии переменного тока в механическую энергию (или обратное преобразование)
Электрическая машина постоянного тока (вентильная или коллекторная)		Преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию (или обратное преобразование)
Электромашинный преобразователь переменного тока (или электрическая машина двойного питания)		Преобразование электрической энергии переменного тока частотой f_1 в электрическую энергию переменного тока частотой $f_2 \neq f_1$ и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)
Электромашинный преобразователь переменного тока в постоянный		Преобразование электрической энергии переменного тока частотоой f_2 в электрическую энергию постоянного тока и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)
Электромашинный преобразователь постоянного тока		Преобразование электрической энергии постоянного тока одного напряжения $U_1=$ в электрическую энергию постоянного тока другого напряжения $U_2= \neq U_1=$ и в механическую энергию (или преобразование в любом другом направлении)

Подвижная часть состоит из сердечника, одной или нескольких обмоток, а также конструктивных деталей, с помощью которых обеспечивается перемещение подвижной части относительно неподвижной в определенном направлении и передается сопряженной машине преобразованная механическая энергия.

Машины, в которых подвижная часть вращается, изменяя свое угловое положение относительно статора, называются *вращающимися*, а их подвижная часть — *ротором*.

Наиболее распространены цилиндрические вращающиеся машины, в которых цилиндрический ротор располагается внутри статора, имеющего форму полого цилиндра (см. рис. 25.1).

В ряде случаев находят применение машины с внешним ротором, в которых неподвижный статор располагается внутри ротора.

Вращающиеся машины, у которых статор и ротор имеют форму дисков, обращенных один к другому плоскими торцевыми поверхностями, называются *торцевыми* (рис. 25.2)

Реже применяются электрические машины, в которых подвижная часть перемещается поступательно, изменяя свое линейное положение относительно статора. Такие машины называются *линейными* и имеют два возможных исполнения: плоское (рис. 25.3) или цилиндрическое (рис. 25.4).

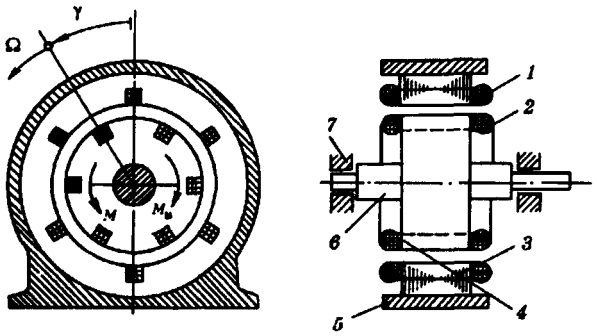


Рис. 25.1. Вращающаяся (цилиндрическая) машина

1 — обмотки статора; *2* — обмотки ротора; *3* — сердечник статора; *4* — сердечник ротора; *5* — конструктивные детали статора; *6* — вал ротора; *7* — аксиально-радиальные опоры

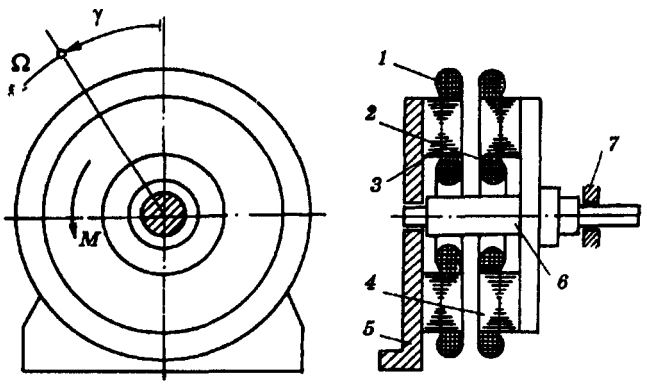


Рис. 25.2. Вращающаяся торцевая машина

(обозначения см. рис. 25.1)

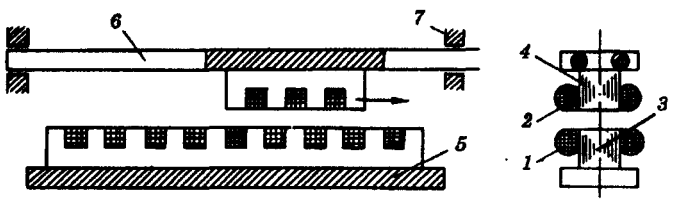


Рис. 25.3. Линейная плоская машина

1 — обмотки статора; *2* — обмотки подвижной части; *3* — сердечник статора; *4* — сердечник подвижной части; *5* — конструктивные детали статора; *6* — шток подвижной части; *7* — опоры

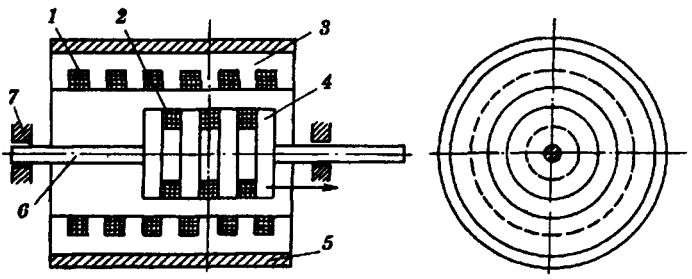


Рис. 25.4. Линейная цилиндрическая машина

(обозначения см. рис. 25.3)

В ряде случаев в машину встраивается преобразователь частоты вращения, представляющий с ней единое целое.

25.3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Рассмотрим вращающуюся индуктивную машину с произвольным числом s контуров обмоток, размещающихся в пазах магнитопроводов статора и ротора. Каждый из этих контуров может состоять из многих катушек, соединенных по той или иной схеме. Магнитопроводы также могут иметь произвольную конфигурацию, На рис. 25.5 показан пример такой машины с общим числом контуров $s = 5$, причем два из них (с номерами *1* и *2*) располагаются на статоре, а три (с номерами *3*, *4*, *5*) — на роторе.

Электромагнитные процессы в индуктивной машине описываются системой уравнений Кирхгофа для контуров обмоток и уравнениями движения ротора. Для машины с линейной магнитной цепью, в которой магнитные проницаемости элементов объемов μ не зависят от индукцин магнитного поля $B[(\mu \neq f(B)]$, потокосцепление любого контура, например k-го (k принимает значения от $k = 1$ до $k = s$), может быть выражено через токи в обмотках i_k, индуктивность k-й обмотки L_{kk} и взаимные индуктивности k-й обмотки со всеми прочими обмотками

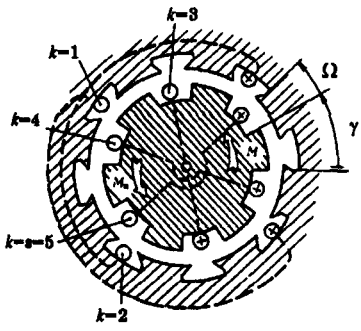


Рис. 25.5. Многообмоточная вращающаяся электрическая машина

L_{kn}, где n принимает любые значения от $n=1$ до $n=s$, кроме $n=k$:

$$\Psi_k = \sum_{n=1}^{s} \Psi_{kn} = \sum_{n=1}^{s} i_n L_{kn}.$$

В общем случае все индуктивности L_{kk} и взаимные индуктивности L_{kn} зависят от размеров обмоток и магнитопроводов и являются функциями углового положения ротора $L_{kn} = f(\gamma)$. Система уравнений Кирхгофа для напряжений обмоток состоит из уравнений, составленных для каждого из контуров. Уравнение для k-го коитура имеет вид

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\Psi_k}{dt} = R_k i_k - e_k = R_k i_k - e_k^{\text{т}} - e_k^{\text{в}}, \quad (25.1)$$

где $e_k = -\dfrac{d\Psi_k}{dt}$ — ЭДС, индуцированная в контуре k; $e_k^{\text{т}} = -\sum_{n=1}^{s} L_{kn} \dfrac{di_n}{dt}$ — трансформаторная ЭДС в контуре k, связанная с изменениями токов i_n в контурах при фиксированном угловом положеиии ротора ($\gamma = \text{const}$); $e_k^{\text{в}} = -\sum_{n=1}^{s} i_n \dfrac{dL_{kn}}{dt} = -\Omega \sum_{n=1}^{s} i_n \dfrac{dL_{kn}}{d\gamma}$ — ЭДС вращеиия в контуре k, связанная с изменеиии взаимоиндуктивностей (или индуктивностей) L_{kn} при фиксированных токах в контурах ($i_n = \text{const}$); $\Omega = d\gamma/dt$ — угловая скорость ротора.

Мгновенная электрическая мощиость, поступающая в контур из сети, которая к иему присоединена, определяется исходя из (25.1):

$$p_k = u_k i_k = R_k i_k^2 + i_k \sum_{n=1}^{s} L_{kn} \frac{d i_n}{dt} + i_k \Omega \sum_{n=1}^{s} i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}.$$

Суммируя мощиости всех коитуров, находим мгновенную мощиость, поступающую в коитуры машины:

$$\sum_{k=1}^{s} p_k = \sum_{k=1}^{s} R_k i_k^2 + \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} L_{kn} \frac{di_n}{dt} + \Omega \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}. \quad (25.2)$$

Часть мощности $\sum_{k=1}^{s} p_k$, поступающая в контуры, а именно $p_э = \sum_{k=1}^{s} R_k i_k^2$, выделяется в виде теплоты в активных сопротивлениях R_k контуров и представляет собой потери мощности при преобразовании.

Другая часть мощности $\sum_{k=1}^{s} p_k$, а именно мощность

$$p_W = \frac{dW}{dt} = \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} L_{kn} \frac{di_n}{dt} + \frac{\Omega}{2} \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma} \quad (25.3)$$

(где $W = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} i_n L_{kn}$ — энергия магнитного поля в машине), идет на изменение энергии магнитного поля в машине вследствие изменения токов в контурах, индуктивностей и взаимоиндуктивностей.

Остальная мощность преобразуется в механическую мощность, передаваемую через вал к сопряженной машине:

$$p_{\text{мех}} = \sum_{k=1}^{s} p_k - p_э - p_W = \frac{\Omega}{2} \sum_{k=1}^{s} i_k \sum_{n=1}^{s} i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma}. \quad (25.4)$$

Электромагнитный момент M, действующий на ротор в даиное мгновение, выражается через мгновенную механическую мощность $p_{\text{мех}}$ по (25.4) или через производную от энергии магнитного поля:

$$M = \frac{p_{\text{мех}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{s} i_k \times \times \sum_{n=1}^{s} i_n \frac{dL_{kn}}{d\gamma} = \left(\frac{dW}{d\gamma}\right)\Bigg|_{\substack{(i_k = \text{const}) \\ (i_n = \text{const})}}. \quad (25.5)$$

Таким образом, в машине с линейной магнитной цепью электромагнитный момент равен частной производной энергии магнитного поля W по углу поворота ротора γ при фиксированных токах в контурах ($i_k = \text{const}$, $i_n = \text{const}$). Если эта производная положительна, то момеит направлен в сторону вращения (или возрастания угла γ) и происходит преобразование электрической эиергии в механическую; если производная отрицательна, то происходит обратное преобразование.

Уравнеиия (25.4) и (25.5) могут быть распространены на машину с иелинейиой магнитной цепью, в которой магнитная проницаемость μ элемента объема зависит как от координат x, y, z, характеризующих положение объема по отношению к средам, так и от индукции магнитного поля в этом объеме [$\mu = f_\mu(B, x, y, z)$].

Для этого нужно предварительно рассчитать магнитное поле такой машины для каждого магнитного состояния, характеризующегося токами i_k и углом γ. Определить распределения индукции $\overline{B} = f_B(x, y, z)$, напряженностей $\overline{H} = f_H(x, y, z)$ и магнитных проницаемостей $\mu = \overline{B}/\overline{H} = f_\mu(x, y, z)$. А затем заменить эту машину ее линейной моделью для данного магнитного состояния, которая имеет такие же размеры, такие же токи i_k, такой же угол, γ, но обладает линейной цепью с магнитной проницаемостью в каждом из элементов объема (с координатами x, y, z), такой же, как в моделируемой машине, т.е. $\mu = f_\mu(x, y, z)$.

Анализируя уравнения (25.4) и (25.5), можно прийти к выводу, что непременным условием осуществления в машине электромеханического преобразования является изменение индуктивностей или взаимных индуктивностей обмоток при повороте ротора. Машина может выполнять свои функции, если производная хотя бы одного параметра по углу поворота ротора не равна нулю:

$$dL_{kn}/d\gamma \neq 0,$$

так только в этом случае $M \neq 0$ и $p_{\text{мех}} = 0$.

Это условие является необходимым, но не достаточным для получения однонаправленного непрерывного механического преобразования, так как требуется еще, чтобы токи в обмотках k и n изменялись таким образом, чтобы не только мгновенные, но и средние значения электромагнитного момента M и мощности $p_{\text{мех}}$ были достаточно велики.

Поскольку в технически осуществимых конструкциях машин магнитные поля, потокосцепления, индуктивности и взаимные индуктивности не могут быть монотонно возрастающими функциями токов и угла поворота ротора γ, единственно возможным является случай их периодического изменения в функции угла γ, когда производные $dL_{kn}/d\gamma$ также изменяются периодически.

Для получения периодической зависимости параметров L_{kn} от угла поворота ротора γ необходимо, чтобы при протекании тока по обмотке n образовывалось магнитное поле, периодически изменяющееся в пространстве (в тангенциальном направлении вдоль зазора).

25.4. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Получить периодические поля позволяют следующие сочетания конструкции обмоток и сердечников.

ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ (БАРАБАННАЯ) РАЗНОИМЕННОПОЛЮСНАЯ ОБМОТКА

Проводники такой обмотки размещаются в пазах на цилиндрической или торцевой (в торцевых машинах) поверхности сердечника, имеющего форму цилиндра или кольцевого цилиндра (тороида) (рис. 25.6). Для этой обмотки характерно периодическое чередование направлений токов в проводниках на поверхности сердечника, обращенной к зазору. При таком чередовании направлений токов образуется периодически изменяющееся в пространстве поле (поверхность сердечника намагничивается "разнонеменнополюсно" — при перемещении по окружности за северным полюсом следует южный, за южным — северный и т.д.).

ТОРОИДАЛЬНАЯ РАЗНОИМЕННАЯ ОБМОТКА

Торондальная обмотка (рис. 25.7) отличается от цилиндрической только тем, что соединение между ее проводниками с токами одного направления охватывают тороид сердечника. С точки зреиия образования поля в зазоре эта обмотка при одинаковой структуре проводников на поверхности, обращенной к зазору, ничем не отличается от цилиндрической обмотки. Она также образует периодически изменяющееся в пространстве поле и имеет те же разновидности, что и цилиндрическая обмотка (тороидальная обмотка имеет некоторые технологические преимущества в малых электрических машинах).

КОЛЬЦЕОБРАЗНАЯ ОБМОТКА И КОГТЕОБРАЗНЫЙ СЕРДЕЧНИК

Периодичность поля в зазоре достигается путем чередования направлений, в которых когтеобразные зубцы сердечника охватывают кольцеобразную обмотку с током (рис 25.8). В отношении образования периодического поля это исполнение равноценно предыдущим. Недостатком конструкции является повышенное магнитное рассеяние между когтеобразными полюсами Достоинство конструкции — простота изготовления обмотки. Область применения конструкции — малые электрические машины, а

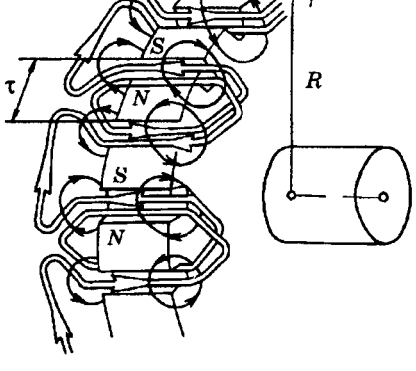


Рис. 25.6. Цилиндрическая (барабанная) разноименнополюсная обмотка

τ — полюсное деление; R — средний радиус по зазору; δ — зазор

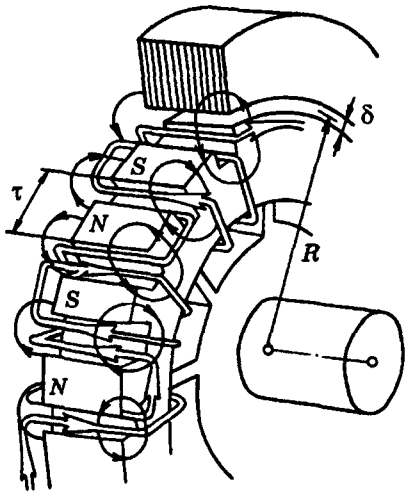


Рис. 25.7. Тороидальная разноименнополюсная обмотка

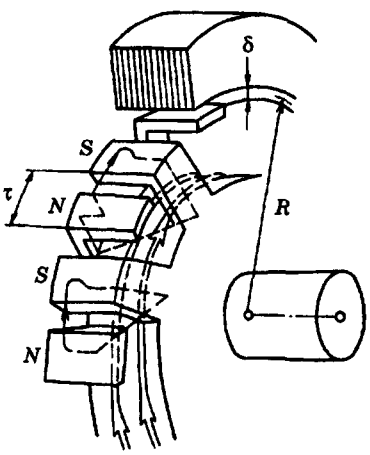


Рис. 25.8. Кольцеобразная обмотка и когтеобразный сердечник

также машины средней мощности в особых исполнениях.

КОЛЬЦЕОБРАЗНАЯ ОДНОИМЕННОПОЛЮСНАЯ (УНИПОЛЯРНАЯ) ОБМОТКА И ЗУБЧАТЫЙ СЕРДЕЧНИК

Кольцеобразная обмотка (рис. 25.9), катушки которой охватывают вал машины, образует в зазоре одноименнополюсное (униполярное) поле. Поверхность внешнего сердечника имеет одну полярность, а внутреннего — другую.

Периодическое изменение индукции поля в зазоре достигается за счет зубчатости поверхности сердечника, обращенной к зазору.

Преимуществом этого исполнения является возможность получения значительно большего числа периодов поля, чем при других исполнениях, поскольку уменьшение размеров пазов не лимитируется необходимостью размещения в них проводников обмотки.

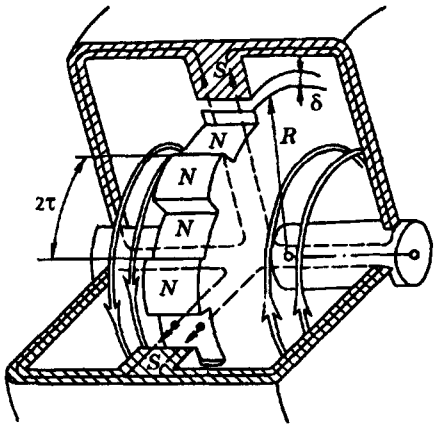


Рис. 25.9. Кольцеобразная одноименнополюсная обмотка и зубчатый сердечник

25.5. ВОЗМОЖНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ПРИНЦИПУ ДЕЙСТВИЯ

Известны три принципиально возможных исполнения электрической машины, при которых индуктивности ее обмоток зависят от углового положения ротора и изменяются периодически во времени при вращении ротора:

1) машина с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе;

2) машина с одной обмоткой на статоре и с зубчатым сердечником ротора;

3) машина с двумя обмотками на статоре и с зубчатым сердечником ротора.

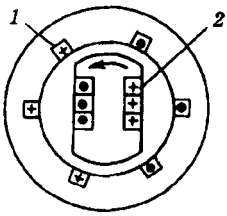
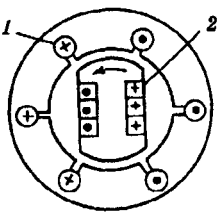
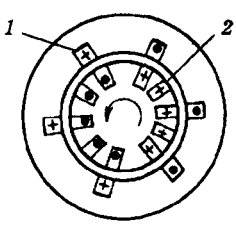
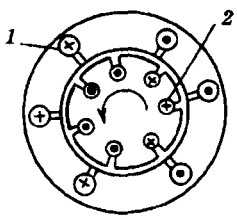
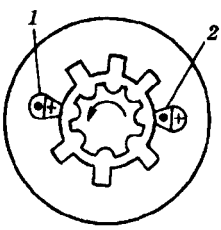
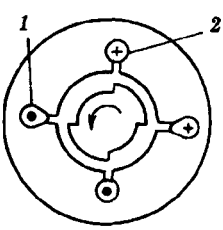
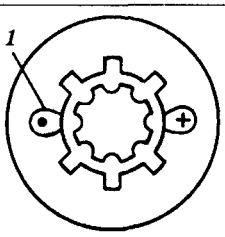
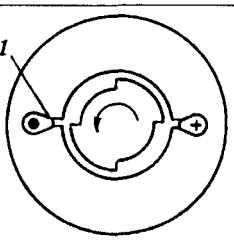
Каждое из исполнений имеет дополнительные модификации.

В зависимости от формы поверхности, обращенной в сторону зазора, различают две качественно различающиеся конструкции сердечников: *зубчатые* и *гладкие*. Зубчатыми называют сердечники с сильно выраженной зубчатостью, пазы которых имеют относительно большое открытие в сторону зазора. Для этих сердечников характерно существенное влияние открытий, а иногда и формы пазов на магнитную проводимость зазора. С целью получения необходимой формы магнитного поля зубцам придается особая форма.

Гладкими называются сердечники со слабо выраженной зубчатостью, пазы которых имеют небольшое (по сравнению с зазором) открытие, а зазор между поверхностью зубца и другим сердечником постоянен.

Зубчатыми выполняются сердечники электрических машин, преобразование энергии в которых связано с периодическими изменениями проводимости зазора. В ряде случаев зубчатые сердечники со специально подобранными размерами зубцов исполь-

Таблица 25.2

Обмотка 2		Обмотка 1, расположенная на статоре, разноименнополюсная	
		Сердечник статора зубчатый	Сердечник статора гладкий
Разноименнополюсная на роторе	Сердечник ротора зубчатый (явнополюсный)		
	Сердечник ротора гладкий		
Разноименнополюсная на статоре	Сердечник ротора зубчатый		
	Сердечник ротора гладкий	Электромеханическое преобразование невозможно	
Отсутствует	Сердечник ротора зубчатый		
	Сердечник ротора гладкий	Электромеханическое преобразование невозможно	

Примечание. Обмотка *1* может быть однофазной или многофазной.

зуются для получения желательной формы поля в зазоре (явнополюсные роторы синхронных машин и статоры машин постоянного тока).

Кроме того, свойства зубчатых приобретают сердечники, пазы которых для удобства укладки обмотки делают открытыми. Применение открытых пазов вместо полузакрытых с малым открытием приводит к увеличению добавочных пульсационных потерь и оправдывается только технологическими соображениями.

Модификации принципиальных исполнений электрических машин (для разноименнополюсных обмоток), охватывающие возможные сочетания обмоток и сердечников статора и ротора, представлены в табл. 25.2. В таблицу включены модификации двух возможных конструкций сердечников — зубчатых и гладких.

Исполнение машины с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе применяется наиболее часто. При этом чаще всего используется модификация с однофазными или многофазными разноименнополюсными обмотками, выполненными с одинаковым числом периодов поля. Именно таким образом устроены наиболее распространенные машины переменного тока: асинхронные машины и синхронные машины в обычном исполнении.



Рис. 25.10. Классификация электрических машин

Электрические машины можно разделить на *явнополюсные* и *неявнополюсные*. В машинах с неявно выраженными полюсами воздушный зазор и его магнитные сопротивления во всех направлениях одинаковые. В явнополюсных машинах имеются четко выраженные продольные и поперечные оси с различными воздушными зазорами и магнитными сопротивлениями.

Асинхронные машины и высокоскоростные синхронные машины выполняются с неявно выраженными полюсами. Многополюсные синхронные машины имеют явно выраженную магнитную систему на роторе. Магнитная система с явно выраженными полюсами на статоре характерна для машин постоянного тока. Явно выраженная конструкция полюсов на статоре и роторе принадлежит индукторным или параметрическим машинам, в которых преобразование энергии осуществляется за счет периодического изменения магнитного сопротивления воздушного зазора.

К машинам переменного тока относятся также и коллекторные двигатели.

В коллекторных двигателях переменного тока в обмотке якоря через преобразователь частоты — коллектор — подводится напряжение изменяющейся частоты.

Коллектор преобразует переменный ток постоянной частоты сети в переменный ток регулируемой частоты. К обмоткам статора подводится переменный ток.

В машинах постоянного тока механический преобразователь частоты — коллектор — может быть заменен коммутатором на полупроводниковых приборах (вентильные машины). В вентильных машинах обмотка возбуждения обычно располагается на роторе. Обмотка переменного тока выполняется на статоре и имеет обычно три-четыре фазы, подключенные к коммутатору.

Электрические машины можно классифицировать по различным признакам. На рис. 25.10 представлена классификация электрических машин по роду тока, принципу действия и типу возбуждения.

Описания конструкции и принципа действия наиболее распространенных типов машин приводятся ниже в соответствующих разделах.

25.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО КОНСТРУКТИВНОМУ ИСПОЛНЕНИЮ, СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ И СПОСОБУ ОХЛАЖДЕНИЯ

Согласно ГОСТ 2479-79 электрические машины классифицируются по конструктивному исполнению и способу монтажа, условное обозначение которых состоит из буквенной части IM и следующих за ней четырех цифр. Первая цифра является номером группы, в которую входит машина по конструктивному исполнению.

Деление на группы представлено в табл. 25.3.

В каждой из девяти групп машины подразделяются в зависимости от способа монтажа (вторая и третья цифры в условном обозначении). Количество и исполнение концов вала обозначаются с помощью четвертой цифры.

Пример условного обозначения электрической машины с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с горизонтальным валом и одним цилиндрическим концом вала: IM1001 (ГОСТ 2479-79).

Наиболее распространенные по конструктивному исполнению и способу монтажа виды электрических машин схематически изображены на рис. 25.11.

По степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, находящимися внутри машины, и попадания посторонних тел внутрь машины, а также по степени защиты от проникновения воды внутрь машины согласно ГОСТ 17494-72, распространяющемуся на машины электрические напряжением до 1000 В (кроме машин для работы во взрывоопасной среде и в особых климатических условиях — тропичес-

Таблица 25.3. Группы конструктивных исполнений электрических машин

Условное обозначение группы	Конструктивное исполнение машины
IM1	Машины на лапах с подшипниковыми щитами
IM2	Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом шите (или щитах)
IM3	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом шите
IM4	Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине
IM5	Машины без подшипников
IM6	Машины с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками
IM7	Машины со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)
IM8	Машины с вертикальным валом, не охватываемые группами от IM1 до IM4
IM9	Машины специального исполнения по способу монтажа

ких, при воздействии влажности, инея, химических реагентов, плесневых грибков и т.п.), имеются следующие исполнения (их характеристика и расшифровка обозначений даны в ГОСТ 14254-80):

1. Открытая электрическая машина (IP00).

2. Защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов машина (IP10, IP20).

3. Каплезащищенная машина: защищенная от капель воды (IP01); защищенная от капель воды и от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP11, IP21, IP12, IP22, IP13, IP23, IP43).

4. Брызгозащищенная машина: защищенная от брызг и прикосновения и попадания посторонних предметов (IP44, IP54).

5. Машина, защищенная от водяных струй, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP55).

6. Машина, защищенная от захлестывания морской волной на палубе корабля, прикосновения, попадания посторонних предметов и вредных отложений пыли (IP56).

7. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при кратковременном погружении в воду (IP57).

8. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (IP58).

Кроме того, выпускаются машины, предназначенные для работы во взрывоопасной среде и в особых климатических условиях:

9. Взрывозащищенная машина, предназначенная для работы во взрывоопасной среде и устроенная таким образом, что при взрыве газов внутри машины возникающее пламя не может проникнуть в окружающую среду.

10. Влагостойкая электрическая машина — для работы при большой влажности

11. Морозостойкая электрическая машина — для работы при возможном образовании инея.

12. Химостойкая машина — для работы при воздействии химических реагентов.

13. Тропическая электрическая машина — для работы при возможном образовании плесневых грибов.

По способу охлаждения электрическне машины могут быть классифицированы по нескольким признакам.

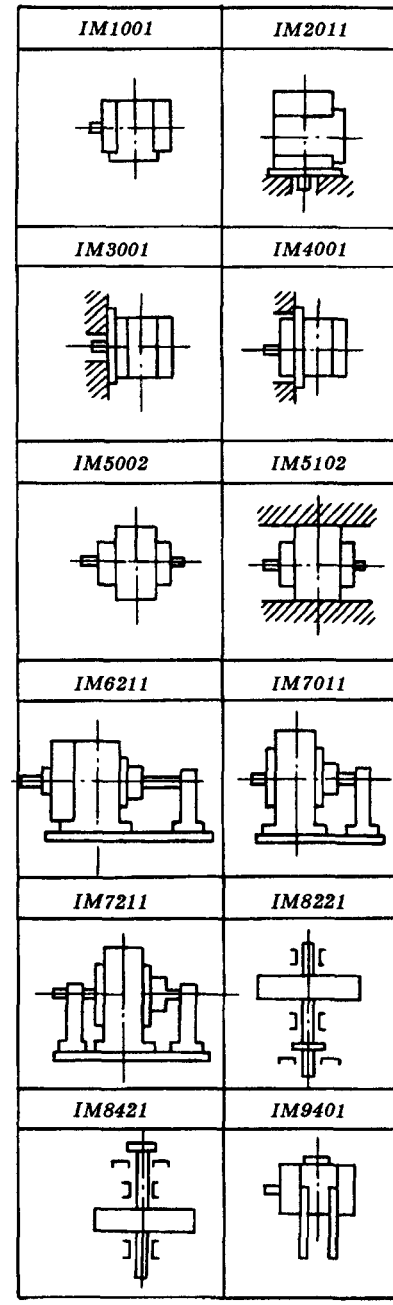


Рис. 25.11. Формы исполнения электрических машин

I. В зависимости от наличия или отсутствия вентиляторов различают:

1) машины с естественным охлаждением, не имеющие специальных вентиляторов (циркуляция охлаждающего воздуха осуществляется за счет вентилирующего действия вращающихся частей машины и явления конвекции). Этот тип охлаждения применяется обычно в открытых машинах;

2) машины с искусственным охлаждением за счет вытяжной (рис. 25.12, *е*) или нагнетательной (рис. 25.12, *а, б, г, д*) вентиляции, в которых движение охлаждающего нагретые части газа (обычно воздух) или жидкости обеспечивается специальным вентилятором. Машины с искусственным охлаждением могут быть подразделены на следующие группы:

а) машины с самовентиляцией, имеющие вентилятор на валу (защищенные или закрытые — рис. 25.12, *а—г, ж*);

б) машины с независимой вентиляцией, вентилятор которых приводится во вращение посторонним двигателем (обычно закрытые — рис. 25.12, *д, е*).

II. В зависимости от того, какие части в машинах с искусственным охлаждением обдуваются воздухом, различают:

1) обдуваемые машины (рис. 25.12, *а*) — закрытые машины, в которых осуществляется принудительное охлаждение только внешней наружной поверхности машины, иногда специально развитой при помощи выступающих ребер (малые машины);

2) продуваемые машины (рис. 25.12, *б, г—ж*) — защищенные или закрытые машины, в которых воздух попадает извне, омывает нагретые поверхности активных частей (обмоток и магнитопровода) и затем выбрасываются наружу (средние и крупные машины).

В обдуваемых закрытых машинах обычно при помощи встроенных вентиляторов усиливают циркуляцию воздуха внутри машины для интенсификации переноса теплоты от активных частей, в которых выделяются потери, к частям, наружная поверхность которых охлаждается внешним обдувом (закрытые машины средней мощности для работы в пыльных помещениях, рис. 25.12, *в*).

III. В зависимости от направления движения охлаждающей среды относительно активных частей в машинах с внутренней вентиляцией различают:

1) машины с аксиальной вентиляцией (рис. 25.12, *в*);

2) машины с аксиально-радиальной вентиляцией (рис. 25.12, *г*);

3) машины с радиальной вентиляцией (рис. 25.12, *б*).

IV. В зависимости от способа охлаждения нагретого в машине газа (обычно воздуха) различают:

1) машины с разомкнутой системой вентиляции — защищенные или закрытые машины, в которых охлаждающий газ засасывается из окружающего помещения или снаружи и выбрасывается в окружающее помещение или наружу.

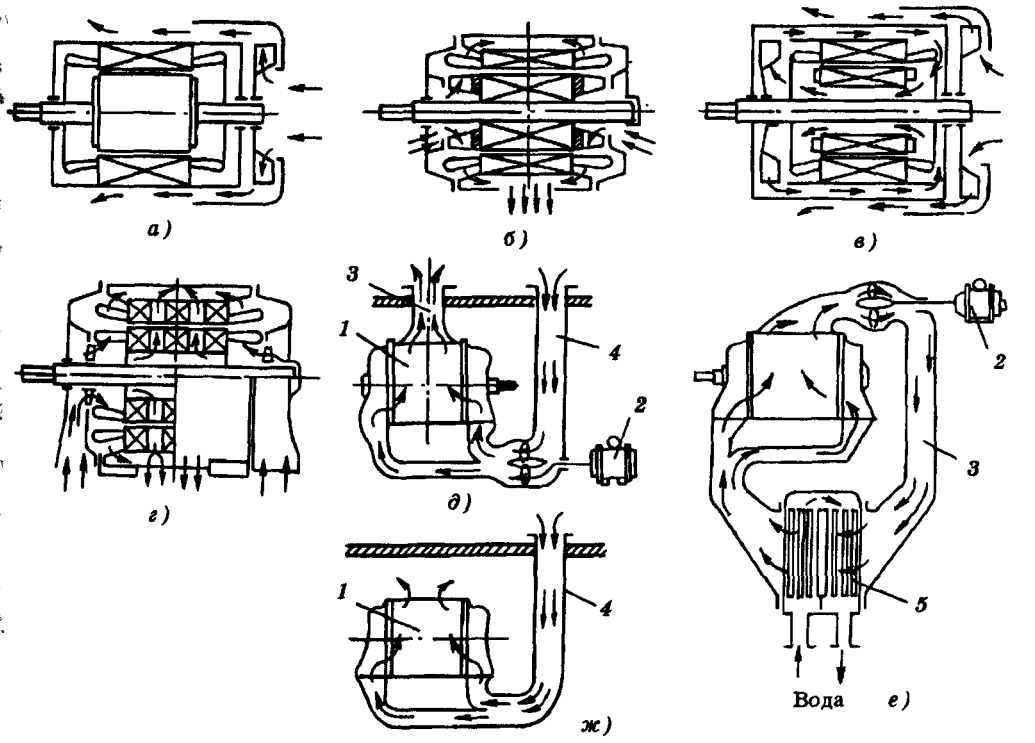


Рис. 25.12. Конструктивные схемы электрических машин с различными способами охлаждения

1 — охлаждаемая машина; *2* — двигатель независимого вентилятора; *3* — трубопровод для нагретого воздуха (газа); *4* — трубопровод для холодного воздуха (газа); *5* — газоохладитель, охлаждаемый водой

Для машин малой и средней мощности, работающих в пригодных помещениях с чистым воздухом, источником и местом выброса охлаждающего воздуха является помещение, в котором установлена машина (рис. 25.12, *б*, *г*).

Забор воздуха снаружи (из атмосферы) по трубопроводу и выброс его в окружающее помещение применяются в закрытых машинах, работающих в помещеннях с загрязненным воздухом (рис. 25.12, *ж*).

Забор воздуха из окружающего помещения и выброс наружу по трубопроводу применяются в мощных машинах во избежание чрезмерного нагрева помещения.

Забор воздуха снаружи (из атмосферы) по трубопроводу и выброс его наружу по трубопроводу применяются в крупных машинах (например, гидрогенераторах), установленных в местностях с чистым воздухом, во избежание чрезмерного нагрева воздуха в помещении и движения его с большой скоростью (рис. 25.12, *д*);

2) машины с замкнутой системой вентиляции — закрытые машины, в которых циркулирует постоянный объем воздуха или другого газа, например водорода, охлаждаемого в газоохладителе водой (рис. 25.12, *е*). Газоохладитель иногда встраивается в машину.

V. В зависимости от того, какое вещество применено в качестве охлаждающей среды, различают машины с воздушным, водородным, масляным, водяным охлаждением. В одной машине может быть применено одновременно несколько охлаждающих веществ (например, водородное охлаждение ротора и масляное охлаждение статора турбогенератора).

Если охлаждение обеспечивается за счет испарения жидкости, то система охлаждения называется испарительной.

VI. В зависимости от способа охлаждения обмоток различают:

1) косвенное охлаждение, при котором охлаждающий газ или жидкость непосредственно не соприкасается с медью обмотки;

2) непосредственное охлаждение, при котором охлаждающий газ или жидкость либо соприкасается с медью обмотки, либо протекает по специальным охлаждающим каналам, выполненным в виде встроенных в обмотку тонкостенных трубок из немагнитного материала, покрытых тонким слоем изоляции. Система непосредственного охлаждения применяется в высокоиспользованных электрических машинах большой мощности (например, крупные турбо- и гидрогенераторы, особо мощные и уникальные асинхронные короткозамкнутые двигатели).

25.7. ОБЩИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ПО ГОСТ 183-74 И ГОСТ 17154-71)

1. Общие технические требования, предъявляемые к вращающимся электрическим машинам переменного и постоянного тока без ограничения мощности, напряжения и частоты, сформулированы в ГОСТ 183-74.

Стандарт распространяется только на электрические машины общего назначения. Электрические машины должны изготавливаться в соответствии с требованиями этого стандарта и стандартов или технических условий на отдельные виды электрических машин.

2. Номинальный режим — режим работы, для которого машина предназначена предприятием-изготовителем.

3. Номинальные данные электрической машины, характеризующие номинальный режим ее работы, относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря и при температуре газообразной охлаждающей среды до +40 °С и охлаждающей воды до +30 °С (в стандартах и технических условиях может быть установлена другая температура охлаждающей воды, но не более +33 °С).

4. Номинальные режимы работы электрических машин должны соответствовать одному из следующих основных режимов:

а) продолжительный режим (условное обозначение режима S1), при котором электрическая машина работает при постоянной нагрузке, продолжающейся не менее, чем необходимо для достижения установившейся температуры всех частей машины, при неизменной температуре охлаждающей среды (рис. 25.13, *а*);

б) кратковременный режим (S2) с длительностью периода неизменной номинальной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин — режим работы, при котором работа с постоянной нагрузкой, продолжающейся менее, чем необходимо для достижения установившейся температуры при неизменной температуре среды, чередуется с отключениями машины, во время которых она охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 25.13, *б*);

в) повторно-кратковременный режим (S3) с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25, 40 и 60 %

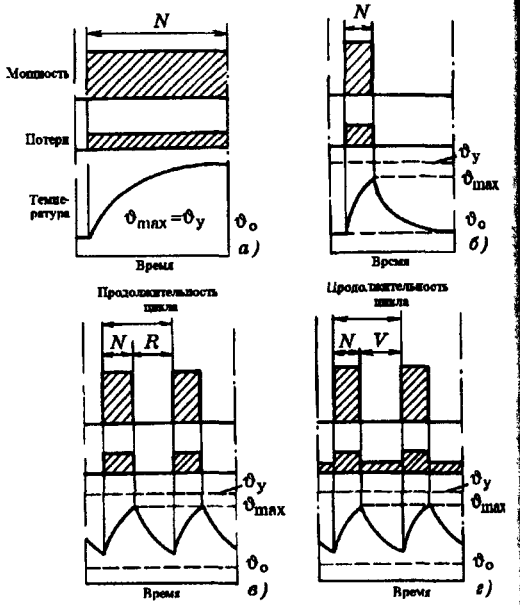


Рис. 25.13. Основные номинальные режимы работы электрических машин

ϑ_y — установившаяся температура; ϑ_o — температура охлаждающей среды; ϑ_{max} — максимальная температура

(продолжительность одного цикла, если нет других указаний, принимают равной 10 мин) — режим работы электрической машины, при котором кратковременная неизменная нагрузка чередуется с отключениями машины, причем во время нагрузки температура машины не достигает установившегося значения, а во время паузы машина не успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Повторно-кратковременный номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью включения, определяемой по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{N}{N+R}\,100,$$

где N — время работы; R — пауза.

Пусковые потери практически не оказывают влияния на превышения температуры отдельных частей машины (рис. 25.13, *в*);

г) перемежающийся режим (S6) с продолжительностью нагрузки (ПН) 15, 25, 40 и 60 % (продолжительность одного цикла, если нет других указаний, принимают равной 10 мин) — режим работы электрической машины, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы температуры отдельных частей электрической машины при неизменной температуре окружающей среды могли достигнуть установившихся значений (рис. 25.13, *г*).

Перемежающийся номинальный режим работы характеризуется относительной (в процентах) продолжительностью нагрузки, определяемой по формуле

$$\text{ПН} = \frac{N}{N+V}\,100,$$

где N — время работы; V — время холостого хода.

Помимо основных номинальных режимов работы S1, S2, S3 и S6 в качестве дополнительных (рекомендуемых) установлены режимы:

а) повторно-кратковременный с частыми пусками (S4) с ПВ = 15, 25, 40 и 60%;

б) повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением (S5) с ПВ = 15, 25, 40 и 60%;

в) перемежающийся с частыми реверсами при электрическом торможении (S7);

г) перемежающийся с двумя или более частотами вращения (S8).

Для дополнительных номинальных режимов устанавливаются число включений в час (режимы S4 и S5), число реверсов в час (режим S7), число циклов в час (режим S8) (если в стандартах или технических условиях не установлено иное) 30, 60, 120, 240 при коэффициенте инерции (см. п. 27) 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.

5. Номинальная мощность электрической машины:

а) для генераторов постоянного тока — полезная мощность на выводах машины;

б) для генераторов переменного тока — полная электрическая мощность при номинальном коэффициенте мощности;

в) для электродвигателей — полезная механическая мощность на валу;

г) для синхронных и асинхронных компенсаторов — реактивная мощность на выводах компенсатора.

Номинальная мощность генераторов постоянного тока и электродвигателей выражается в ваттах (Вт), киловаттах (кВт), генераторов переменного тока и компенсаторов — в вольт-амперах (В·А), киловольт-амперах (кВ·А) или мегавольт-амперах (МВ·А). Номинальная мощность указывается на заводском щитке электрической машины.

6. Номинальное напряжение электрической машины — напряжение, соответствующее ее номинальному режиму работы.

Номинальное напряжение трехфазной электрической машины — ее междуфазное (линейное) напряжение.

Номинальное напряжение ротора асинхронной машины с фазным ротором — напряженне разомкнутой роторной обмотки (вторичной цепи) между контактными кольцами при неподвижном роторе и статорной обмотке (первичной цепи), включенной на номинальное напряжение.

При двухфазной обмотке ротора за его номинальное напряжение принимают наибольшее из напряжений между контактными кольцами.

Номинальное напряжение возбуждения электрической машины с независимым возбужденнем — номинальное напряжение того независимого источника, от которого получается возбуждение.

7 Номинальное напряженне возбуждения электрической машины — напряжение на выводах или контактных кольцах обмотки возбуждения при питании ее номинальным током возбуждения и сопротивлении обмотки постоянному току, которое должно быть приведено к расчетной рабочей температуре (см. п. 22).

8. Номинальный ток электрической машины — ток, соответствующий номинальному режиму ее работы.

9. Номинальный ток возбуждения электрической машины — ток возбуждения, соответствующий номинальному режиму ее работы.

10. Номинальное изменение напряжения электрического генератора — изменение напряжения на выводах генератора (при работе отдельно от других генераторов) при изменении нагрузки от номинальной до нулевой и сохраненнн номинальной частоты вращения, кроме того, для машин с независимым возбужденнем — при сохраненнн номинального тока возбуждения, а для машин с самовозбуждением — при обмотке возбуждения, имеющей расчетную рабочую температуру (см. п. 22) и неизменное сопротивление цепи обмотки возбуждения. Изменение напряжения выражают в процентах или долях номинального напряжения генератора

11. Номинальная частота вращения электрической машины — частота вращения, соответствующая работе машины при номинальном напряжении, мощности или моменте и частоте тока.

12. Номинальное изменение частоты вращения электродвигателя — изменение частоты его вращения при номинальном напряжении на его выводах (в случае двигателя переменного тока, кроме того,

при номинальной частоте тока) при следующих изменениях нагрузки:

а) для двигателей, допускающих нулевую нагрузку, — от номинальной нагрузки до нулевой;

б) для двигателей, не допускающих нулевой нагрузки, — от номинальной нагрузки до 1/4 номинальной нагрузки.

Изменение частоты вращения выражают в процентах или долях номинальной частоты вращения.

13. Нагрузка электрической машины — мощность, которую развивает электрическая машина в данный момент времени. Для обозначения нагрузки, равной номинальной мощности, применяют термин "номинальная нагрузка".

Нагрузка выражается в единицах мощности (полной или активной), либо в процентах, либо в долях номинальной мощности.

Нагрузка может быть задана током, потребляемым или отдаваемым электрической машиной, и выражена в амперах, процентах или долях номинального тока.

14. Практически неизменной нагрузкой электрической машины считается такая нагрузка, при которой отклонения тока и напряжения якоря и мощности машины от значений, соответствующих заданному режиму работы, составляют не более ±3%, тока возбуждения и частоты — не более ±1%.

15. Перегрузкой называется превышение фактической нагрузки электрической машины над ее номинальной нагрузкой. Перегрузку выражают в процентах или долях номинальной нагрузки.

16. Коэффициентом полезного действия (КПД) называется отношение полезной (отдаваемой) активной мощности электрической машины к затрачиваемой (подводимой) активной мощности.

17. Практически симметричной трехфазной системой напряженнй называется такая трехфазная система напряжений, для которой напряженне обратной последовательности не превышает 1% напряжения прямой последовательности при разложении данной трехфазной системы напряжений на системы прямой и обратной последовательностей.

18. Практически симметричной трехфазной системой токов называется такая трехфазная система токов, для которой ток обратной последовательности не превышает 1% тока прямой последовательности.

19. Практически синусоидальным напряжением называется такое напряжение, у которого коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. п. 20) не превышает 5%.

20. Коэффициентом искажения снусоидальности кривой напряженнн (или тока) называется выраженное в процентах отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд высших гармонических составляющих данной периодической кривой к амплитуде ее основной гармонической.

21. Рабочей температурой отдельной части электрической машины называется практически установившаяся температура этой части, соответствующая номинальному режиму работы при неизменной температуре окружающей среды.

22. Расчетной рабочей температурой называется температура, к которой приводят сопротивления обмоток электрнческой машины прн подсчете потерь в них. Расчетная рабочая температура устанавливается равной 75 °С для обмоток, принятые предельные допускаемые превышения температуры изоляции которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е и В, 115 °С для обмоток, принятые предельные допустимые превышения температуры изоляции которых соответствуют классам нагревостойкости F и Н.

23. Практнчески холодным состоянием электрической машины называется состояние, при котором температура любой части электрической машины отличается от температуры окружающей среды не более чем на ±3 °С.

24. Превышением температуры отдельной части электрической машины называется разность между температурой этой частн и температурой окружающей среды.

25. Практически установившейся температурой отдельной части электрической машины называется температура, изменение которой в течение 1 ч не превышает 1 °С при условин, что нагрузка машины и температура окружающей среды остаются неизменнымн.

26. Правым направлением вращения электрической машины с односторонним приводом считается вращение по часовой стрелке, если смотреть на электрическую машину со стороны присоединения ее к первичному двигателю или рабочему механизму.

27. Коэффициентом инерции называется отношение суммы приведенного к валу двигателя момента инерции приводимого механизма и момента инерцнн ротора (якоря) двигателя к моменту инерции ротора (якоря) двигателя. Условное обозначение коэффициента инерции F_J.

28. Начальным пусковым током машины переменного тока называется установившееся значение тока при неподвижном роторе, номинальном подведенном напряжении, номинальной частоте и соединенни обмоток, соответствующем номинальному режиму работы машины.

29. Начальным пусковым вращающим моментом машины переменного тока называется момент вращения, развиваемый машиной при неподвижном роторе, установившемся токе, номинальном подведенном напряженин, номинальной частоте и соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы машины.

30. Минимальным вращающим моментом асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в процессе пуска в ход называется наименьший момент вращения, развиваемый в процессе разгона двигателя от неподвнжного состояния до скорости, соответствующей максимальному моменту, при номинальном напряженин, номинальной частоте и при соединении обмоток, соответствующем номинальному режиму работы двигателя (или пусковому режиму для однофазных двигателей с пусковой схемой).

31. Максимальным вращающим моментом двигателя переменного тока называется наибольший момент вращення, развиваемый двигателем в установившемся режиме, прн номинальном напряжении, номнналной частоте и прн соединении обмоток, соответствующем номинальному режнму работы двигателя, а для снхронного двигателя и при иоминальном токе возбуждения.

Раздел 26

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Асинхронной машиной называется электрическая машина, одна из обмоток которой, обычно трехфазная, присоединена к электрической сети или специальному преобразователю, а вторая выполнена короткозамкнутой (беличья клетка) или фазной, замкнутой на сопротивления.

В асинхронных (несинхронных) машинах частота вращения ротора ω_r не равна частоте вращения поля $\omega_п$.

Как и во всех электрических машинах поля статора и ротора неподвижны одно относительно другого, а частоты токов в роторе f_2 и статоре f_1 связаны соотношением

$$f_2 = f_1 s , \qquad (26.1)$$

где s — скольжение, или относительная угловая скорость

$$s = \frac{\omega_п \mp \omega_r}{\omega_п} . \qquad (26.2)$$

В зависимости от частоты и направления вращения ротора по отношению к полю различают четыре режима работы асинхронных машин. Когда $0<\omega_r<\omega_п$, имеет место двигательный режим, при $\omega_п<\omega_r<+\infty$ — генераторный режим. В этом режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой. В тормозном режиме ротор асинхронной машины вращается в сторону, противоположную вращению поля. Когда асинхронная машина эксплуатируется при неподвижном роторе ($\omega_r = 0$), имеет место трансформаторный режим работы асинхронной машины.

Режимы работы асинхронной машины в функции скольжения представлены на рис. 26.1. В двигательном режиме при $0<s<1$ асинхронная машина преобразует электрическую энергию в механическую. В генераторном режиме, когда $0>s>-\infty$, ротор асинхронной машины вращается в сторону вращения поля с частотой, большей синхронной. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую. В тормозном режиме механическая и электрическая энергии преобразуются в теплоту. Этот режим, как правило, может быть кратковременным и используется для быстрого останова. Трансформаторный режим, когда $s = 1$, используется для регулирования амплитуды и фазы напряжения. Асинхронные машины наибольшее распространение получили как двигатели.



Рис. 26.1. Режимы работы асинхронных машин

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели (АД) в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность АД — несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются АД мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения от 500 до 3000 об/мин.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания поля в зазоре асинхронной машины необходима реактивная мощность, которая забирается из сети или от других источников реактивной мощности. АД не могут работать с $\cos\varphi = 1$. Это существенный недостаток асинхронных машин, ограничивающий их применение в генераторном режиме.

Уравнения установившегося режима асинхронной машины получаются из дифференциальных уравнений путем замены оператора дифференцирования d/dt на $j\omega$ [26.1]:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_s &= -\dot{E}_0 + \dot{I}_s \underline{Z}_s ; \\ \dot{U}_r &= \dot{E}_0 - \dot{I}_r Z_r - \dot{I}_r R_r \frac{1-s}{s} ; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_s + \dot{I}_r , \end{aligned}\right\} \qquad (26.3)$$

где $\dot{U}_s$, $\dot{U}_r$ — напряжения на фазах обмотки статора и ротора (в двигателях с короткозамнутым ротором $\dot{U}_r = 0$); $\dot{I}_s$, $\dot{I}_r$ — токи в обмотках статора и ротора, $\dot{I}_0$ — ток холостого хода; $\dot{E}_0 = -j x_0 \dot{I}_0$ — ЭДС холостого хода; $x_0 = \omega M$ — индуктивное сопротивление взаимной индукции; M — взаимная индуктивность.

В (26.3) входят сопротивления обмоток статора и ротора:

$$\underline{Z}_s = R_s + j x_s ; \qquad (26\ 4)$$

$$\underline{Z}_r = R_r + j x_r , \qquad (26.5)$$

где R_s и R_r — активные сопротивления обмоток статора и ротора; x_s и x_r — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора,

$$x_s = \omega l_{\sigma s} \text{ и } x_r = \omega l_{\sigma r} ; \qquad (26.6)$$

$l_{\sigma s}$ и $l_{\sigma r}$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

Активные и индуктивные сопротивления определяются расчетным или опытным путем по методикам, изложенным в [26.3].

Теория асинхронной машины может рассматриваться, как теория трансформатора, во вторичную обмотку которого вводится активное сопротивление $R_r \frac{1-s}{s}$. Мощность, которая выделяется на этом сопротивлении, пропорциональна полезной мощности на валу машины.

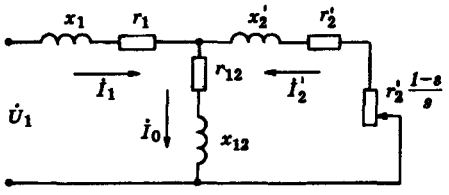


Рис. 26.2. Т-образная схема замещения

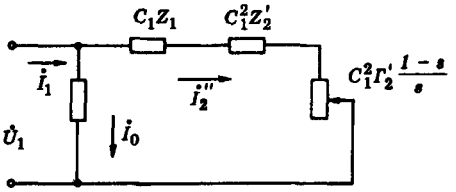


Рис. 26.3. Г-образная схема замещения

Схемы замещения и векторные диаграммы строятся для приведеиных значений, когда $\underline{Z}_s = \underline{Z}_1$, и $\underline{Z}_2 = \underline{Z}'_2$.

Уравнениям (26.3) соответствует Т-образная схема замещения асинхронной машины (рис. 26.2).

При построении схемы замещения число витков ротора приводится к числу витков обмотки фазы статора.

Определив активное сопротивлеиие, эквивалентное потерям в стали P_0, $r_{12} = P_0/I_0^2$, вводим его значение в выражение сопротивлеиия взаимиой иидукции

$$\underline{Z}_{12} = r_{12} + j\, x_{12}. \qquad (26.7)$$

Параметры схемы замещения в относительных единицах для единых серий изменяются в следующих пределах: $x_{12}^* = 2 \div 4$; $r_{12}^* = 0{,}08 \div 0{,}35$; $r_1^* \approx r_2'^* = 0{,}01 \div 0{,}07$; $x_1^* \approx x_2'^* = 0{,}08 \div 0{,}13$.

При электромеханическом преобразоваиии энергии в асинхронных машинах, как и в других машинах, происходит преобразование энергии в теплоту. Электрические потери в роторе асиихронной машины пропорциональны скольжению

$$P_{э2} = P_{эм}\, s, \qquad (26.8)$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность — мощность в воздушном зазоре машины.

Чтобы большая часть электрической мощности преобразовывалась в механическую, асиихронные машины используются в электроприводах, где допустимо небольшое скольжение ($s = 1 \div 4\%$). При глубоком скольжении ($s = 10 \div 50\%$) асиихроиные машииы используются редко, так как в этом случае большая часть мощности, забираемой из сети, преобразуется в теплоту, что приводит к низкому КПД и увеличению габаритов асиихронной машины, в том числе и из-за трудностей, связанных с отводом теплоты от активных частей машины.

Если обмотки ротора представляют собой замкнутые контуры, то при скольжении $s = 1$ вся мощность, поступающая на ротор, преобразуется в теплоту. При скольжении $s = 0$ мощность на ротор не поступает. При скольжениях, отличных от 0 и 1, электромагнитная мощность преобразуется в даигательном режиме в механическую мощность и теплоту, а в генераторном режиме — в электрическую и теплоту.

Более удобной схемой замещения асинхронной машины является Г-образная схема замещения, в которой иамагничивающий контур вынесен на вывод сети (рис. 26.3). В этой схеме замещения ток холостого хода не зависит от нагрузки и совпадает с действительным током $\dot{I}_0$ в Т-образной схеме замещения при идеальиом холостом ходе, когда $s = 0$. При этом $C_1 = \dfrac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12}}$, а $\dot{I}''_2 = -\dfrac{\dot{I}'_2}{C_1}$.

Г-образная схема замещения используется в теории асинхронных машин для построения круговой диаграммы [26.1].

Круговая диаграмма имеет важное зиачение в теории асинхроииых машин и до сих пор используется для построения рабочих характеристик. Она является примером применения теории электромехаиики для решения практических задач.

С помощью круговой диаграммы характеристики и основные параметры машины определяются не только для двигательного, но и для генераторного и тормозного режимов. При этом основные построения не изменяются.

Круговую диаграмму строят на основе Г-образиой схемы замещеиия.

Параметры схемы замещения находят с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания. Определив из двух опытов, параметры схемы замещения и построив круговую диаграмму, можно получить рабочие характеристики.

Рабочие характеристики АД показаны на рис. 26.4.

Электромагнитный момент асинхронной машины определяется через электромагнитную мощность и частоту вращения поля $\omega_п$:

$$M_{эм} = P_{эм}/\omega_п. \qquad (26.9)$$

Так как преобразование энергии в электрических машинах происходит в воздушном зазоре, где сосре-

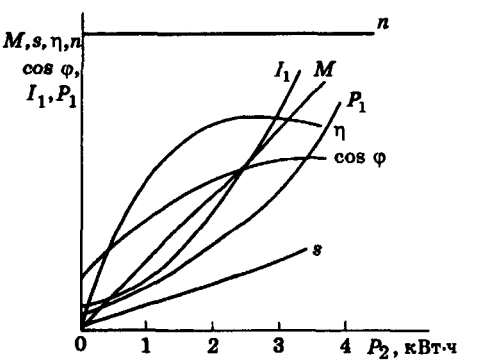


Рис. 26.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

M — момент на валу машины; P_1 — потребляемая из сети мощность; η — КПД машины; $I_1 = I_s$ — ток статора; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности; P_2 — мощность на валу

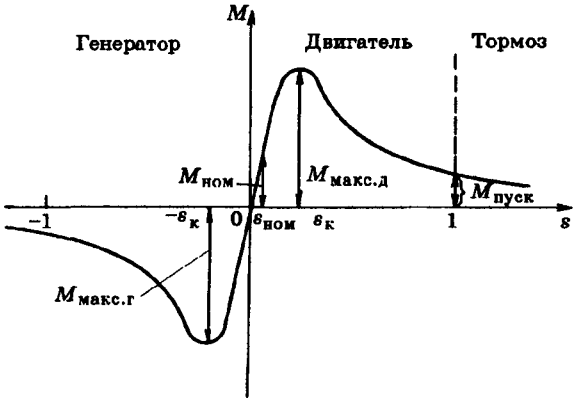


Рис. 26.5. Механическая характеристика асинхронной машины
$s_{ном}$ — номинальное скольжение; $s_к$ — критическое скольжение

доточена энергия магнитного поля, электромагнитный момент приложен к зубцам статора и ротора. Если магнитный поток проходит по зубцам, а в пазу он равен нулю, то момент к обмотке не приложен. Обычно статор прикреплен к фундаменту и не перемещается, а вращается ротор машины. Если дать возможность вращаться и ротору, и статору, они будут вращаться в противоположные стороны, причем сумма частот вращения ротора и статора будет примерно равна частоте вращения поля $\omega_п$.

В практических расчетах широко применяется выражение для расчета $M_{эм}$, полученное из Г-образной схемы замещения (см. рис. 26.3):

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1+\frac{r'_2}{s}\right)^2+\left(x_1+x'_2\right)^2}}. \qquad (26.10)$$

Так как $P_{э2} = P_{эм}\, s = \omega_п\, M_{эм}\, s$, то

$$M_{эм} = P_{э2}/\omega_п\, s = m_2 I_2^2\, r'_2/\omega_п\, s =$$

$$= m_1\, I'^2_2\, r'_2/\omega_п\, s. \qquad (26.11)$$

Подставляя в (26.11) значение тока I'_2 для двухполюсной машины, получаем

$$M_{эм} = \frac{m_1 U_1^2\, r'_2}{s\,\omega_п\left[\left(r_1+\frac{r'_2}{s}\right)^2+\left(x_1+x'_2\right)^2\right]}. \qquad (26.12)$$

По (26.12) построена механическая характеристика асинхронной машины $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ (рис. 26.5). Механическая характеристика также представляет собой зависимость частоты вращения ротора от момента $\omega_r = f(M)$ или наоборот $M = f(\omega_r)$.

Подставляя в (26.12) различные значения s, можно получить зависимость $M = f(s)$ для всех режимов работы асинхронной машины. Согласно (26.12) $M = 0$ при $s = 0$ и $s = \pm\infty$.

На рис. 26.6 представлены зависимости момента от скольжения при изменении активного сопротивления ротора и $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$. При изменении r'_2 максимальный момент не изменяется, и при увеличении r'_2 (r_2^2, r_2^3, r_2^4) максимум момента смещается в область больших скольжений. Увеличить активное сопротивление обмотки ротора можно путем подключения добавочного резистора к фазной вторичной обмотке.

Установившееся значение пускового момента соответствует $s = 1$. Из (26.12) пусковой момент

$$M_{пуск} = \frac{m_1\, U_1^2\, r'_2}{\omega_п\left[\left(r_1+r'_2\right)^2+\left(x_1+x'_2\right)^2\right]}. \qquad (26.13)$$

Пусковой момент пропорционален квадрату напряжения и зависит от r'_2. Смещая $M_{макс}$ за счет увеличения r'_2, можно получить $M_{макс} = M_{пуск}$. Это имеет место согласно (26.12) и (26.11) при

$$r'_2 \approx \sqrt{r_1^2+(x_1+x'_2)^2}. \qquad (26.14)$$

АД наиболее просты в изготовлении и наиболее дешевы, поэтому применение их в регулируемых электроприводах весьма перспективно. Однако до сих пор не найдено дешевой и экономичной систе-

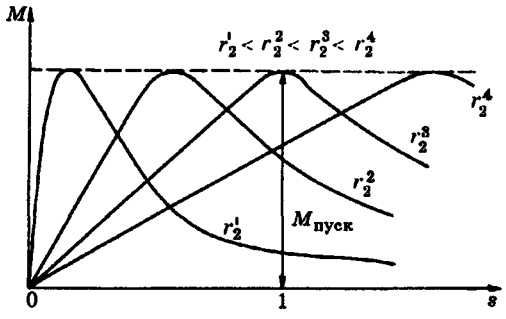


Рис. 26.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя при различных активных сопротивлениях ротора

мы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, хотя известны десятки способов ее регулирования.

Если обратиться к формуле, связывающей частоту вращения ротора с частотой вращения поля и скольжением,

$$\omega_r = \omega_{\text{п}}(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s), \qquad (26.15)$$

то из нее следует, что есть всего три варианта регулирования скорости: путем изменения частоты сети f_1, числа пар полюсов p и скольжения s.

Регулирование скорости путем переключения числа полюсов ступенчатое. При жестких механических характеристиках двигателя, когда скольжение изменяется в небольших пределах, регулирование скорости экономичное.

Для изменения числа полюсов на статоре в одни и те же пазы можно уложить две отдельные обмотки с разными числами полюсов. В зависимости от необходимой частоты вращения включается та или другая обмотка.

Наиболее простым способом, обеспечивающим плавное регулирование частоты вращения АД, является изменение скольжения. Принципиальным недостатком этого способа регулирования частоты вращения является низкий КПД, так как потери в роторе пропорциональны скольжению. И какие бы ни предлагались варианты схем изменения скольжения, а их существуют десятки, в электромеханическом преобразователе энергии возможности преобразования в теплоту и в механическую мощность одинаковые. В АД это проявляется особенно наглядно ($P_{э2} = P_{эм}\, s$). Эта связь не зависит от способа изменения скольжения, когда в процессе регулирования участвует одна машина.

Наиболее перспективным способом регулирования частоты вращения АД является частотный. Изменение частоты, подводимой к двигателю, осуществляется преобразователем частоты. При частотном регулировании изменяется синхронная частота вращения (частота вращения поля), а двигатель работает с небольшим скольжением. Регулирование экономичное, однако через преобразователь частоты проходит вся мощность и габариты преобразователя частоты превышают габариты двигателя. При преобразовании частоты и напряжения сети преобразователь частоты изменяет напряжение и частоту на выходе по закону U/f = const, что обеспечивает работу асинхронного двигателя при постоянном магнитном потоке.

Передача и распределение электрической энергии в основном осуществляются трехфазной системой напряжений и токов. Однако в бытовых сетях и на транспорте применяются однофазные системы. Для преобразования электрической энергии в механическую в этих сетях применяются однофазные двигатели. Бытовые однофазные АД выпускаются промышленностью в количестве нескольких десятков миллионов в год. В основном их применяют в холодильниках, вентиляторах, кондиционерах и насосах.

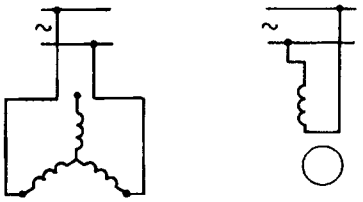


Рис. 26.7. Схема однофазного двигателя

Однофазный АД на статоре имеет однофазную обмотку и короткозамкнутый ротор с заливкой пазов алюминием. Конструктивно однофазный двигатель отличается от обычного трехфазного выполнением обмотки статора. Однофазный двигатель получается из трехфазного, когда используется одна или две его фазы (рис. 26 7).

В однофазных двигателях ток статора создает пульсирующее поле, которое может быть представлено двумя вращающимися в противоположные стороны полями. Прямое и обратное поля имеют одинаковые амплитуды и вращаются в противоположные стороны с одинаковой частотой. Эти поля создают моменты прямой M_{11} и обратной M_{22} последовательностей, а результирующий момент

$$M_{эм} = M_{11} - M_{22}. \qquad (26\,16)$$

Основной недостаток однофазных двигателей — отсутствие пускового момента. Чтобы при однофазном питании двигатель развивал пусковой момент, необходимо от пульсирующего поля в воздушном зазоре машины перейти к эллиптическому полю Наилучшие условия при пуске будут при круговом поле, когда момент от обратного поля $M_{22} = 0$.

Однофазные конденсаторные двигатели (рис. 26 8) получили наибольшее распространение. В этом двигателе две обмотки на статоре w_α^s, w_β^s сдвинуты одна относительно другой на электрический угол 90°. Чтобы обеспечить сдвиг во времени между токами в обмотках w_α^s и w_β^s, включают конденсатор ($C_{\text{р}}$ — рабочий; $C_{\text{п}}$ — пусковой)

Одной из разновидностей однофазных АД являются двигатели с экранированными полюсами или, как их еще называют, однофазные двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе В таких двига-

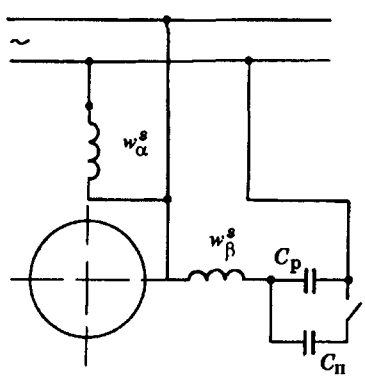


Рис. 26.8. Однофазный конденсаторный двигатель

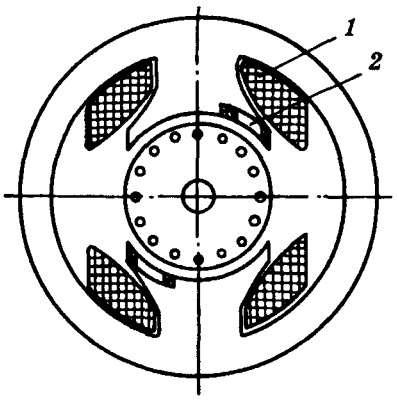


Рис. 26.9. Однофазный двигатель с короткозамкнутым витком на полюсе

телях статор имеет явно выраженные полюсы, на которых располагается однофазная катушечная обмотка *1* (рис. 26.9). Каждый полюс продольным пазом разделен на две неравные части. Меньшую часть полюсного наконечника охватывает короткозамкнутый виток *2*. Штампованный из листов электротехнической стали магнитопровод статора образует полюсные наконечники и спинку статора. Ротор двигателя обычный, с короткозамкнутой обмоткой.

Можно без преувеличения сказать, что промышленное производство приводится в движение АД. В настоящее время АД выпускаются едиными сериями. Основная серия асинхронных машин 4А включает в себя двигатели мощностью от 0,4 до 400 кВт. Выпускаются высоковольтные машины в внде единой серии А4 мощностью свыше 400 кВт Разработана единая серия асинхронных машин АИ.

Конструкции асинхронных машин делятся на два основных типа· с короткозамкнутым ротором и фазным ротором Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, которые в серии 4А выполняются на все мощности, включая 400 кВт

Обмотки короткозамкнутых роторов выполняются литыми из алюминия или его сплавов При заливке одновременно отливаются стержни, лежащие в пазах, и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками и штырями для крепления балансировочных грузиков

Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных асинхронных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку из круглых или прямоугольных проводов, которая выполняется так же, как и обмотка статора.

Серия 4А является массовой серией АД, рассчитанной на применение в различных отраслях промышленности Она охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 высотах оси вращения — от 50 до 355 мм

Серия включает основное исполнение АД, ряд модификаций и специализированные исполнения Двигатели основного исполнения соответствуют общим требованиям и предназначены для нормальных условий работы. Они выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот оси вращения, охватываемых серией. Это трехфазные АД с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты IP44 или IP23

Модификации и специализированные исполнения АД серии 4А построены на базе их основного исполнения, т.е. имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов и высоты оси вращения. Они выпускаются отдельными отрезками серий на определенные высоты оси вращения и номинальные мощности и предназначаются для применения в механизмах, предъявляющих специфические требования к электроприводу, или в условиях эксплуатации, отличных от нормальных

К электрическим модификациям АД серии 4А относятся АД с повышенным пусковым моментом, с

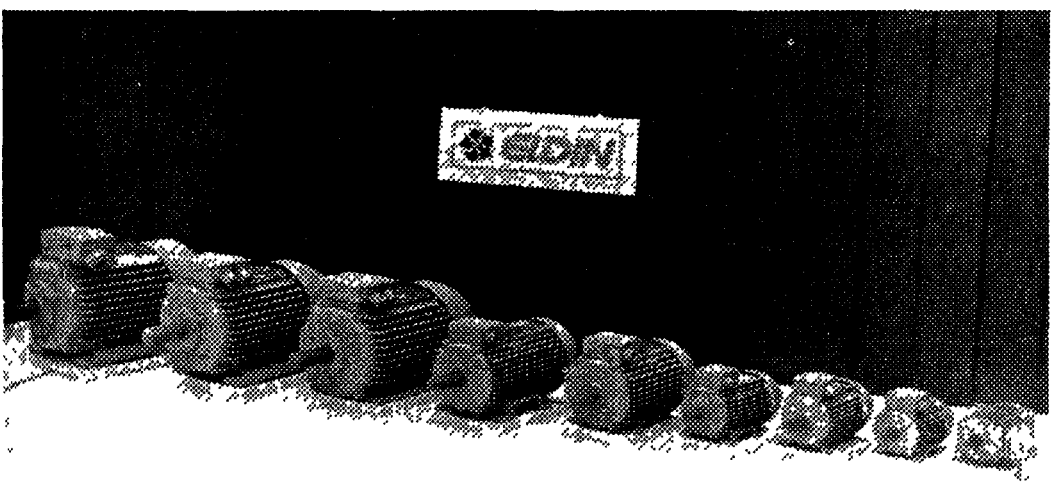


Рис. 26.10. Асинхронные двигатели новой серии RA

повышенным номинальным скольжением, многоскоростные, двигатели с частотой питания 60 Гц.

К конструктивным модификациям АД серии 4А относятся АД с фазным ротором, малошумные, со *встроенными электромагнитными тормозами, встраиваемые, со встроенной температурной защитой,* для моноблочных насосов.

Модификации исполнений по условиям окружающей среды включают АД тропического исполнения, химическистойкие, сельскохозяйственного, влаго- и морозостойкого, пылезащищенного и рудничного исполнений.

К специализированным исполнениям АД серии 4А относятся высокоточные двигатели, двигатели привода лифтов, частотно-управляемые и двигатели для привода деревообрабатывающих станков.

В серии 4А принята следующая система обозначений:

4А	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х,
1	2	3	4	5	6	7	8,

где 1 — название серии (4А);

2 — исполнение АД по способу защиты; буква Н — исполнение IP23, отсутствие буквы означает исполнение IP44;

3 — исполнение АД по материалу станины и щитов: А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные (или наоборот); отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные;

4 — высота оси вращения, мм (две или три *цифры);*

5 — установочный размер по длине станины: буквы S, M или L (меньший, средний или больший);

6 — длина сердечника: А — меньшая, В — большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 — число полюсов АД (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Асинхронные двигатели серии 4А основного исполнения *предназначены для работы от сети трехфазного* переменного тока частотой 50 Гц.

Двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт изготовляют на номинальные напряжения 220 и 380 В: мощностью от 0,55 до 11 кВт — 220, 380 и 660 В; мощностью от 15 до 110 кВт — 220/380 и 380/660 В; мощностью от 132 до 400 кВт — 380/660 В.

Ниже приводятся данные АД серий 4А и АИР (табл. 26.1—26.5).

Более подробные сведения о двигателях серии 4А см. в [26.4].

Таблица 26.1. **Соотношение мощностей с установочными размерами для двигателей основного исполнения, степень защиты IP44**

Высота оси вращения, мм	Условная длина станины	Мощность, кВт, при числе полюсов					
		2	4	6	8	10	12
50	—	0,09; 0,12	0,06; 0,09	—	—	—	—
56	—	0,18; 0,25	0,12; 0,18	—	—	—	—
63	—	0,37; 0,55	0,25; 0,37	0,18; 0,25	—	—	—
71	—	0,75; 1,1	0,55; 0,75	0,37; 0,55	0,25	—	—
80	—	1,5; 2.2	1,1; 1,5	0,75; 1,1	0,37; 0,55	—	—
90	L	3,0	2,2	1,5	0,75; 1,1	—	—
100	S	4,0	3,0	—	—	—	—
	L	5,5	4,0	2,2	1,5	—	—
112	M	7,5	5,5	3,0; 4,0	2,2; 3,0	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4,0	—	—
	M	11,0	11,0	7,5	5,5	—	—
160	S	15,0	15,0	11,0	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15,0	11,0	—	—
180	S	22,0	22,0	—	—	—	—
	M	30,0	30,0	18,5	15,0	—	—
200	M	37,0	37,0	22,0	18,5	—	—
	L	45,0	45,0	30,0	22,0	—	—
225	M	55,0	55,0	37,0	30,0	—	—
250	S	75,0	75,0	45,0	37,0	30,0	—
	M	90,0	90,0	55,0	45,0	37,0	—
280	S	110,0	110	75,0	55,0	37,0	—
	M	132	132	90,0	75,0	45,0	—
315	S	160	160	110	90,0	55,0	45,0
	M	200	200	132	110	75,0	55,0
355	S	250	250	160	132	90,0	75,0
	M	315	315	200	160	110	90,0

Таблица 26.2. Соотношение мощностей с установочными размерами для двигателей основного исполнения, степень защиты IP23

Высота оси вращения, мм	Условная длина станины	Мощность, кВт, при числе полюсов					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22,0	18,5	—	—	—	—
	M	30,0	22,0	—	—	—	—
180	S	37,0	30,0	18,5	15,0	—	—
	M	45,0	37,0	22,0	18,5	—	—
200	M	55,0	45,0	30,0	22,0	—	—
	L	75,0	55,0	37,0	30,0	—	—
225	M	90,0	75,0	45,0	37,0	—	—
250	S	110	90,0	55,0	45,0	—	—
	M	132	110	75,0	55,0	—	—
280	S	160	132	90,0	75,0	45,0	—
	M	200	160	110	90,0	55,0	—
315	S	—	200	132	110	75,0	55,0
	M	250	250	160	132	90,0	75,0
335	S	315	315	200	160	110	90,0
	M	400	400	250	200	132	110

Таблица 26.3. Технические данные двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP44, способ охлаждения ICA0141

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
Синхронная частота вращения 3000 об/мин								
4АА50А2У3	0,9	8,6	60	0,7	2,2	2	1,2	5
4АА50В2У3	0,12	9,7	63	0,7	2,2	2	1,2	5
4АА56А2У3	0,18	8	66	0,76	2,2	2	1,2	5
4АА56В2У3	0,25	8	68	0,77	2,2	2	1,2	5
4А63А2У3	0,37	8,3	70	0,86	2,2	2	1,2	5
4А63В2У3	0,55	8,5	73	0,86	2,2	2	1,2	5
4А71А2У3	0,75	5,3	77	0,87	2,2	2	1,2	5,5
4А71В2У3	1,1	6,3	77,5	0,87	2,2	2	1,2	5,5
4А80А2У3	1,5	5	81	0,85	2,2	2	1,2	6,5
4А80В2У3	2,2	5	83	0,87	2,2	2	1,2	6,5
4А90L2У3	3	5,4	84,5	0,88	2,2	2	1,2	6,5
4А100S2У3	4	4	86,5	0,89	2,2	2	1,2	7,5
4А100L2У3	5,5	4	87,5	0,91	2,2	2	1,2	7,5
4А112М2У3	7,5	2,6	87,5	0,88	2,2	2	1	7,5
4А132М2У3	11	3,1	88	0,9	2,2	1,6	1	7,5
4А160S2У3	15	2,3	88	0,91	2,2	1,4	1	7,5
4А160М2У3	18,5	2,3	88,5	0,92	2,2	1,4	1	7,5
4А180S2У3	22	2	88,5	0,91	2,2	1,4	1	7,5
4А180М2У3	30	1,9	90,5	0,9	2,2	1,4	1	7,5
4А200М2У3	37	1,9	90	0,89	2,2	1,4	1	7,5
4А200L2У3	45	1,8	91	0,9	2,2	1,4	1	7,5
4А225М2У3	55	2,1	91	0,92	2,2	1,2	1	7,5
4А250S2У3	75	1,4	91	0,89	2,2	1,2	1	7,5
4А250М2У3	90	1,4	92	0,9	2,2	1,2	1	7,5
4А280S2У3	110	2	91	0,98	2,2	1,2	1	7
4А280М2У3	132	2	91,5	0,89	2,2	1,2	1	7
4А315S2У3	160	1,9	92	0,9	1,9	1	0,9	7
4А315М2У3	200	1,9	92,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4А355S2У3	250	1,9	92,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4А355М2У3	315	2	93	0,91	1,9	1	0,9	7

Продолжение табл. 26.3

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АА50А4У3	0,06	8,1	50	0,6	2,2	2	1,2	5
4АА50В4У3	0,09	8,6	55	0,6	2,2	2	1,2	5
4АА56А4У3	0,12	8	63	0,66	2,2	2	1,2	5
4АА56В4У3	0,18	8,7	64	0,64	2,2	2	1,2	5
4АА63А4У3	0,25	8	68	0,65	2,2	2	1,2	5
4АА63В4У3	0,37	9	68	0,69	2,2	2	1,2	5
4А71А4У3	0,55	8,7	70,5	0,70	2,2	2	1,6	4,5
4А71В4У3	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5
4А80А4У3	1,1	6,7	75	0,81	2,2	2	1,6	5
4А80В4У3	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	1,6	5
4А90L4У3	2,2	5,4	80	0,83	2,2	2	1,6	6
4А100S4У3	3	5,3	82	0,83	2,2	2	1,6	6,5
4А100L4У3	4	5,3	84	0,84	2,2	2	1,6	6
4А112М4У3	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	1,6	7
4А132S4У3	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
4А132М4У3	11	2,8	87,5	0,87	2,2	2	1,6	7,5
4А160S4У3	15	2,7	89	0,88	2,2	1,4	1	7
4А160М4У3	18,5	2,7	90	0,88	2,2	1,4	1	7
4А180S4У3	22	2	90	0,9	2,2	1,4	1	7
4А180М4У3	30	2	91	0,89	2,2	1,4	1	7
4А200М4У3	37	1,7	91	0,9	2,2	1,4	1	7
4А200L4У3	45	1,8	92	0,9	2,2	1,4	1	7
4А225М4У3	55	2	92,5	0,9	2,2	1,2	1	7
4А250S4У3	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2	1	7
4А250М4У3	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2	1	7
4А280S4У3	110	2,3	92,5	0,9	2	1,2	1	7
4А280М4У3	132	2,3	93	0,9	2	1,2	1	6,5
4А315S4У3	160	2	93,5	0,91	1,9	1	0,9	7
4А315М4У3	200	1,7	94	0,92	1,9	1	0,9	7
4А355S4У3	250	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
4А355М4У3	315	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АА63А6У3	0,18	11,5	56	0,62	2,2	2	1,2	4
4АА63В6У3	0,25	10,8	59	0,62	2,2	2	1,2	4
4А71А6У3	0,37	8	64,5	0,69	2,2	2	1,6	4
4А71В6У3	0,55	8	67,5	0,71	2,2	2	1,6	4
4А80А6У3	0,75	8	69	0,74	2,2	2	1,6	4
4А80В6У3	1,1	8	74	0,74	2,2	2	1,6	4
4А90L6У3	1,5	6,4	75	0,74	2,2	2	1,6	5,5
4А100L6У3	2,2	5,1	81	0,73	2,2	2	1,6	5,5
4А112МА6У3	3	5,5	81	0,76	2,2	2	1,6	6
4А112МВ6У3	4	5,1	82	0,81	2,2	2	1,6	6
4А132S6У3	5,5	4,1	85	0,8	2,2	2	1,6	7
4А132М6У3	7,5	3,2	85,5	0,81	2,2	2	1,6	7
4А160S6У3	11	3	86	0,86	2	1,2	1	6
4А160М6У3	15	3	87,5	0,87	2	1,2	1	6
4А180М6У3	18,5	2,7	88	0,87	2	1,2	1	6
4А200М6У3	22	2,5	90	0,9	2	1,2	1	6,5
4А200L6У3	30	2,3	90,5	0,9	2	1,2	1	6,5
4А225М6У3	37	2	91	0,89	2	1,2	1	6,5
4А250S6У3	45	1,5	91,5	0,89	2	1,2	1	7
4А250М6У3	55	1,5	92	0,88	2	1,2	1	7
4А280S6У3	75	2	92	0,89	1,9	1,2	1	7
4А280М6У3	90	2	92,5	0,89	1,9	1,2	1	7
4А315S6У3	110	2	93	0,9	1,9	1	0,9	7

Окончание табл. 26.3

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
4А315М6У3	132	2	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4А355S6У3	160	1,8	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4А355М6У3	200	1,8	94	0,9	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4А71В8У3	0,25	9,3	56	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4А80А8У3	0,37	10	61,5	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4А80В8У3	0,55	10	64	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4А90LА8У3	0,75	6	68	0,62	1,7	1,6	1,2	3,5
4А90LВ8У3	1,1	7	70	0,68	1,7	1,6	1,2	3,5
4А100L8У3	1,5	7	74	0,65	1,7	1,6	1,2	5,5
4А112МА8У3	2,2	6	76,5	0,71	2,2	1,8	1,4	6
4А112МВ8У3	3	6,5	79	0,74	2,2	1,8	1,4	6
4А132S8У3	4	4,1	83	0,7	2,2	1,8	1,4	6
4А132М8У3	5,5	4,5	83	0,74	2,2	1,8	1,4	6
4А160S8У3	7,5	2,7	86	0,75	2,2	1,4	1	6
4А160М8У3	11	2,7	87	0,75	2,2	1,4	1	6
4А180М8У3	15	2,6	87	0,82	2	1,2	1	6
4А200М8У3	18,5	2,5	88,5	0,84	2,2	1,2	1	6
4А200L8У3	22	2,7	88,5	0,84	2	1,2	1	6
4А225М8У3	30	2	90	0,81	2	1,2	1	6
4А250S8У3	37	1,6	90	0,83	2	1,2	1	6
4А250М8У3	45	1,4	91,5	0,82	2	1,2	1	6
4А280S8У3	55	2,2	92	0,84	1,9	1,2	1	6,5
4А280М8У3	75	2,2	92,5	0,85	1,9	1,2	1	6,5
4А315S8У3	90	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4А315М8У3	110	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4А355S8У3	132	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4А355М8У3	160	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
4А250S10У3	30	1,9	88	0,81	1,9	1,2	1	6
4А250М10У3	37	1,8	89	0,81	1,9	1,2	1	6
4А280S10У3	37	2	91	0,78	1,8	1	1	6
4А280М10У3	45	2	91,5	0,78	1,8	1	1	6
4А315S10У3	55	2	92	0,79	1,8	1	0,9	6
4А315М10У3	75	2	92	0,8	1,8	1	0,9	6
4А355S10У3	90	2	92,5	0,83	1,8	1	0,9	6
4А355М10У3	110	2	93	0,83	1,8	1	0,9	6
Синхронная частота вращения 500 об/мин								
4А315S123У3	45	2,5	90,5	0,75	1,8	1	0,9	6
4А315М12У3	55	2,5	91	0,75	1,8	1	0,9	6
4А355S12У3	75	2	91,5	0,76	1,8	1	0,9	6
4А355М12У3	90	2	92	0,76	1,8	1	0,9	6

Таблица 26.4. **Технические данные двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP23, способ охлаждения ICA01**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
Синхронная частота вращения 3000 об/мин								
4АН160S2У3	22	2,8	88	0,88	2,2	1,3	1	7
4АН160М2У3	30	2,9	90	0,91	2,2	1,3	1	7
4АН180S2У3	37	1,8	91,5	0,89	2,2	1,2	1	7

Продолжение табл. 26.4

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
4АН180М2У3	45	1,9	91	0,9	2,2	1,3	1	7
4АН200М2У3	55	2	91	0,9	2,2	1,3	1	7
4АН200L2У3	75	2	92	0,9	2,2	1,3	1	7
4АН225М2У3	90	2,4	92	0,88	2,2	1,2	1	7
4АН250S2У3	110	1,6	93,5	0,88	2,2	1,2	1	7
4АН250М2У3	132	1,9	93,5	0,9	2,2	1,2	1	7
4АН280S2У3	160	1,4	94	0,9	2,2	1,2	1	6,5
4АН280М2У3	200	1,4	94,5	0,9	2,2	1,2	1	6,5
4АН315М2У3	250	1,3	94,5	0,91	1,9	1	0,9	6,5
4АН355S2У3	315	1,1	94,5	0,92	1,9	1	0,9	6,5
4АН355М2У3	400	1,1	95	0,92	1,9	1	0,9	6,5
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АН160S4У3	18,5	3,2	88,5	0,87	2,1	1,3	1	6,5
4АН160М4У3	22	2,9	90	0,88	2,1	1,3	1	6,5
4АН180S4У3	30	2,3	90	0,84	2,2	1,2	1	6,5
4АН180М4У3	37	2,1	90,5	0,89	2,2	1,2	1	6,5
4АН200М4У3	45	1,8	91	0,89	2,2	1,2	1	6,5
4АН200L4У3	55	1,7	92	0,89	2,2	1,2	1	6,5
4АН225М4У3	75	1,6	92,5	0,89	2,2	1,2	1	6,5
4АН250S4У3	90	1,4	94	0,88	2,2	1,2	1	6,5
4АН250М4У3	110	1,5	93,5	0,89	2,2	1,2	1	6,5
4АН280S4У3	132	2	93	0,89	2	1,1	1	6
4АН280М4У3	160	2	93,5	0,9	2	1,2	1	6
4АН315S4У3	200	1,8	94	0,91	2	1,2	0,9	6
4АН315М4У3	250	1,8	94	0,91	2	1,2	0,9	6,5
4АН355S4У3	315	1,2	94,5	0,91	2	1,2	0,9	6
4АН355М4У3	400	1,2	94,5	0,91	2	1,2	0,9	6,5
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АН180S6У3	18,5	2,5	87	0,85	2	1,2	1	6
4АН180М6У3	22	2,4	88,5	0,87	2	1,2	1	6
4АН200М6У3	30	2,3	90	0,88	2	1,2	1	6
4АН200L6У3	37	1,9	90,5	0,88	2	1,2	1	6,5
4АН225М6У3	45	2	91	0,87	2	1,2	1	6,5
4АН250S6У3	55	1,4	92,5	0,86	2	1,2	1	6,5
4АН250М6У3	75	1,5	93	0,87	2	1,2	1	7
4АН280S6У3	90	2,2	92,5	0,89	2	1,2	1	6
4АН280М6У3	110	2,2	92,5	0,89	2	1,2	1	6
4АН315S6У3	132	1,8	93	0,89	1,9	1,2	0,9	6
4АН315М6У3	160	1,8	93,5	0,89	1,9	1,2	0,9	6
4АН355S6У3	200	1,6	94	0,9	1,9	1,2	0,9	6,5
4АН355М6У3	250	1,6	94	0,9	2	1,2	0,9	6,5
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4АН180S8У3	15	2,6	86,0	0,8	1,9	1,2	1	5,5
4АН180М8У3	18,5	2,7	87,5	0,8	1,9	1,2	1	5,5
4АН200М8У3	22	2,6	89	0,84	1,9	1,2	1	5,5
4АН200L8У3	30	2,3	89,5	0,82	1,9	1,2	1	5,5
4АН225М8У3	37	2	90	0,81	1,9	1,2	1	5,5
4АН250S8У3	45	1,5	91	0,81	1,9	1,2	1	5,5
4АН250М8У3	55	1,6	92	0,81	1,9	1,2	1	6
4АН280S8У3	75	2,5	92	0,85	1,9	1,2	1	5,5
4АН280М8У3	90	2,5	92,5	0,86	1,9	1,2	1	5,5

Окончание табл. 26.4

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	cos φ	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
4АН315S8У3	110	2	93	0,86	1,9	1,2	0,9	5,5
4АН315M8У3	132	2	93,5	0,86	1,9	1,2	0,9	5,5
4АН355S8У3	160	1,8	93,5	0,86	1,9	1,1	0,9	5,5
4АН355M8У3	200	1,8	94	0,86	1,9	1,1	0,9	5,5
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
4АН280S10У3	45	2,8	90	0,81	1,8	1	1	5
4АН280M10У3	55	2,8	90,5	0,81	1,8	1	1	5
4АН315S10У3	75	2,2	91	0,82	1,8	1	0,9	5,5
4АН315M10У3	90	2,2	91,5	0,82	1,8	1	0,9	5,5
4АН355S10У3	110	1,8	92	0,83	1,8	1	0,9	5,5
4АН355M10У3	132	1,8	92,5	0,83	1,8	1	0,9	5,5
Синхронная частота вращения 500 об/мин								
4АН315S12У3	55	2,5	90,5	0,78	1,8	1	0,9	5,5
4АН315M12У3	75	2,5	91	0,78	1,8	1	0,9	5,5
4АН355S12У3	90	2,2	91,5	0,77	1,8	1	0,9	5,5
4АН355M12У3	110	2,2	92	0,77	1,8	1	0,9	5,5

В конце восьмидесятых годов была разработана серия АИ, которая должна была заменить серию 4А и серию 4АМ.

Привязка мощностей к установочным размерам была предусмотрена в двух вариантах: АИС — по нормам CENELEC для экспортных поставок; АИР — по нормам DIN для внутренних поставок.

В табл. 26.5 приведены технические данные серии АИР.

Таблица 26.5. Технические данные двигателей серии АИР

Типоразмер	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
		Скольжение, %	КПД, %	cos φ				
Синхронная частота вращения 3000 об/мин								
АИР71А2	0,75	6	78,5	0,83	2,1	2,2	1,6	6
АИР71В2	1,1	6,5	79	0,83	2,1	2,2	1,6	6
АИР80А2	1,5	5	81	0,85	2,1	2,2	1,6	7
АИР80В2	2,2	5	83	0,87	2	2,2	1,6	7
АИР90L2	3	5	84,5	0,88	2	2,2	1,6	7
АИР100S2	4	5	87	0,88	2	2,2	1,6	7,5
АИР100L2	5,5	5	88	0,89	2	2,2	1,6	7,5
АИР112М2, АИРХ112М2	7,5	3,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7,5
АИР132М2, АИРХ132М2	11	3	88	0,9	1,6	2,2	1,2	7,5
АИР160S2, АИРХ160S2	15	3	89	0,89	1,8	2,7	1,7	7
АИР160М2, АИРХ160М2	18,5	3	89,5	0,9	1,8	2,7	1,7	7
АИР180S2	22	2,7	89,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7
АИР180М2	30	2,5	90,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7,5
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
АИР71А4	0,55	9,5	70,5	0,7	2,3	2,2	1,8	5
АИР71В4	0,75	10	73	0,73	2,2	2,2	1,6	5
АИР80А4	1,1	7	75	0,81	2,2	2,2	1,6	5,5
АИР80В4	1,5	7	78	0,83	2,2	2,2	1,6	5,5
АИР90L4	2,2	7	81	0,83	2,1	2,2	1,6	6,5
АИР100S4	3	6	82	0,83	2	2,2	1,6	7

Окончание табл. 26.5

Типоразмер	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$M_{пуск}/M_{ном}$	$M_{макс}/M_{ном}$	$M_{мин}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$
		Скольжение, %	КПД, %	cos φ				
АИР100L4	4	6	85	0,84	2	2,2	1,6	7
АИР112M4, АИРХ112M4	5,5	4,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7
АИР132S4, АИРХ132S4	7,5	4	87,5	0,86	2	2,2	1,6	7,5
АИР132M4, АИРХ132M4	11	3,5	87,5	0,87	2	2,2	1,6	7,5
АИР160S4, АИРХ160S4	15	3	89,5	0,89	1,9	2,9	1,8	7
АИР160M4, АИРХ160M4	18,5	3	90	0,89	1,9	2,9	1,8	7
АИР180S4	22	2,5	90	0,87	1,5	2,4	1,3	6,5
АИР180M4	30	2	91,5	0,86	1,7	2,7	1,6	7
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
АИР71A6	0,37	8,5	65	0,66	2	2,2	1,6	4,5
АИР71B6	0,55	8,5	68,5	0,7	2	2,2	1,6	4,5
АИР80A6	0,75	8	70	0,72	2	2,2	1,6	4,5
АИР80B6	1,1	8	74	0,74	2	2,2	1,6	4,5
АИР90L6	1,5	7,5	76	0,72	2	2,2	1,6	6
АИР100L6	2,2	5,5	81	0,74	2	2,2	1,6	6
АИР112MA6, АИРХ112MA6	3	5	81	0,76	2	2,2	1,6	6
АИР112MB6, АИРХ112MB6	4	5	82	0,81	2	2,2	1,6	6
АИР132S6, АИРХ132S6	5,5	4	85	0,8	2	2,2	1,6	7
АИР132M6, АИРХ132M6	7,5	4	85	0,81	2	2,2	1,6	7
АИРХ160S6, АИРХ160S6	11	3	87	0,84	1,7	2,5	1,6	6,5
АИР160M6, АИРХ160M6	15	3	88	0,85	1,7	2,6	1,6	6,5
АИР180M6	18,5	2	88	0,85	1,6	2,4	1,5	6,5
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
АИР132S8, АИРХ132S8	4	4,5	83	0,7	1,8	2,2	1,4	6
АИР132M8, АИРХ132M8	5,5	5	83	0,74	1,8	2,2	1,4	6
АИР160S8, АИРХ160S8	7,5	3	87	0,75	1,6	2,4	1,4	5,5
АИР160M8, АИРХ180M8	11	3	87,5	0,75	1,6	2,4	1,4	6
АИР180M8	15	2,5	89	0,82	1,6	2,2	1,5	5,5

В 1993—1995 гг. на ПО "Ярославский электромашиностроительный завод" была разработана серия RA (Российская асинхронная), в которой представлены АД на мощность от 0,37 до 90 кВт с высотой оси вращения от 71 до 250 мм, предназначенные для работы во всех отраслях промышленности, сельском и коммунальном хозяйствах по российским и международным стандартам (DIN и CENELEC).

Структура обозначения типа двигателя:

RA — условное обозначение серии;

160 — высота оси вращения;

М — установочные размеры по длине станины: S — короткая, М — средняя, L — длинная;

А — длина сердечника статора А или В при условии сохранения установочного размера;

2 — число полюсов;

У3 — вид климатического исполнения (У2, У3, Т2): У — умеренный климат; Т — тропический климат; 2 — для эксплуатации на свежем воздухе; 3 — для эксплуатации в закрытых помещениях.

На рис. 26.10 показаны двигатели новой единой серии RA.

В табл. 26.6 приведены данные трехфазных АД с короткозамкнутым ротором, степени защиты IP44 и IP54.

Таблица 26.6. Трехфазные асинхронные двигатели

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	cos φ	Ток при 380 В, А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Момент инерции, кг·м^2
Синхронная частота вращения 300 об/мин (два полюса)											
71	0,37	RA71A2	5	2800	71,0	0,81	1,5	5,0	2,3	2,4	0,0004
	0,55	RA71B2	6	2850	74,0	0,84	1,8	6,5	2,3	2,4	0,0005
80	0,75	RA80A2	9	2820	74,0	0,83	2	5,3	2,5	2,7	0,0008
	1,1	RA80B2	11	2800	77,0	0,86	2	5,2	2,6	2,8	0,0012
90	1,5	RA90S2	13	2835	79,0	0,87	3	6,5	2,8	3,0	0,0010
	2,2	RA90L2	15	2820	82,0	0,87	4	6,5	2,9	3,4	0,0015
100	3,0	RA100L2	20	2895	83,0	0,86	6	7,0	2,4	2,6	0,0038
112	4,0	RA112M2	41	2895	84,0	0,87	9	6,8	2,2	3,3	0,0082
132	5,5	RA132SA2	43	2880	85,0	0,89	11	6,5	2,4	3,0	0,0155
	7,5	RA132SB2	49	2890	87,0	0,89	15	7,0	2,5	3,2	0,0135
160	11,0	RA160MA2	112	2940	87,5	0,89	22	6,8	2,0	3,3	0,0438
	15,0	RA160MB2	116	2940	90,0	0,86	29	7,5	2,0	3,2	0,0470
	18,5	RA160L2	133	2940	90,0	0,88	35	7,5	2,0	3,2	0,0533
180	22,0	RA180M2	147	2940	90,5	0,89	42	7,5	2,1	3,5	0,0604
200	30,0	RA200LA2	170	2950	92,0	0,89	55	7,5	2,4	3,0	0,1164
	37,0	RA200LB2	230	2950	92,0	0,89	68	7,5	2,4	3,0	0,1326
225	45,0	RA225M2	300	2955	93,0	0,89	83	7,0	2,7	3,0	0,1790
250	55,0	RA250M2	450	2965	93,0	0,89	99	7,0	2,7	3,0	0,3000
Синхронная частота вращения 1500 об/мин (четыре полюса)											
71	0,25	RA71A4	5	1325	62,0	0,78	1	3,2	1,7	1,7	0,0006
	0,37	RA71B4	6	1375	66,0	0,76	1	3,7	2,0	2,0	0,0008
80	0,55	RA80A4	8	1400	71,0	0,80	1	5,0	2,3	2,8	0,0018
	0,75	RA80B4	10	1400	74,0	0,80	2	5,0	2,5	2,8	0,0023
90	1,1	RA90S4	13,5	1420	77,0	0,80	3	5,5	2,3	2,6	0,0034
	1,5	RA90L4	15,5	1420	78,5	0,80	4	5,5	2,3	2,8	0,0042
100	2,2	RA100LA4	22	1420	79,0	0,82	5	6,0	2,2	2,6	0,0048
	3,0	RA100LB4	24	1420	81,0	0,81	7	6,2	2,2	2,6	0,0058
112	4,0	RA112M4	37	1430	85,5	0,84	9	6,5	2,2	2,9	0,0103
132	5,5	RA132S4	45	1450	87,0	0,85	11	7,0	2,4	3,0	0,0229
	7,5	RA132M4	52	1455	88,0	0,83	15	7,0	2,8	3,2	0,0277
160	11,0	RA160M4	110	1460	88,5	0,86	22	6,5	1,8	2,8	0,0613
	15,0	RA160L4	129	1460	90,0	0,87	29	7,0	1,9	2,9	0,0862
180	18,5	RA180M4	149	1460	90,5	0,89	35	7,0	1,9	2,9	0,1038
	22,0	RA180L4	157	1460	91,0	0,88	42	7,0	2,1	2,8	0,1131
200	30,0	RA200L4	200	1475	91,0	0,86	59	7,7	2,7	3,2	0,3200
225	37,0	RA225S4	300	1470	92,0	0,87	70	7,7	2,7	3,2	0,4000
	45,0	RA225M4	340	1470	92,0	0,87	85	7,7	2,7	3,2	0,4500
250	55,0	RA250M4	430	1470	93,0	0,85	105	7,0	2,8	3,0	0,4400

Продолжение табл. 26.6

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	cos φ	Ток при 380 В, А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Момент инерции, кг м^2
Синхронная частота вращения 1000 об/мин (шесть полюсов)											
71	0,18	RA71A6	6	835	48,0	0,69	1	2,3	2,0	2,0	0,0006
	0,25	RA71B6	6	860	56,0	0,72	1	3,0	2,0	2,0	0,0009
80	0,37	RA80A6	8	910	62,0	0,72	1	3,3	2,0	2,5	0,0027
	0,55	RA80B6	10	915	63,0	0,72	1	2,3	2,0	2,5	0,0030
90	0,75	RA90S6	13	935	70,0	0,72	2	4,0	2,2	2,5	0,0040
	1,1	RA90L6	15	925	72,0	0,72	2	4,0	2,2	3,0	0,0052
100	1,5	RA100L6	22	925	76,0	0,76	4	4,5	2,0	2,1	0,0063
112	2,2	RA112M6	36	960	78,0	0,74	5	5,5	1,9	2,5	0,0185
132	3,0	RA132S6	41	960	83,0	0,79	7	5,9	2,2	2,6	0,0252
	4,0	RA132MA6	50	960	84,0	0,80	9	6,0	2,2	2,6	0,0368
	5,5	RA132MB6	56	950	83,0	0,82	12	6,0	2,2	2,5	0,0434
160	7,5	RA160M6	110	970	87,0	0,80	16	6,0	2,0	2,8	0,0916
	11,0	RA160L6	133	970	88,5	0,82	23	6,5	2,2	2,9	0,1232
180	15,0	RA180L6	155	970	89,0	0,82	31	7,0	2,3	3,0	0,1512
200	18,5	RA200LA6	182	970	87,0	0,82	38	5,5	1,8	2,7	0,3100
	22,0	RA200LB6	202	970	87,0	0,84	45	6,0	2,0	2,5	0,3600
Синхронная частота вращения 750 об/мин (восемь полюсов)											
112	1,5	RA112M8	42	700	73,0	0,70	5	4,5	1,7	2,1	0,0225
132	2,2	RA132S8	65	720	81,0	0,70	6	5,0	1,7	2,1	0,0530
	3,0	RA132M8	73	715	81,0	0,70	8	6,0	1,8	2,4	0,0625
160	4,0	RA160MA8	107	730	84,0	0,71	10	4,8	1,8	2,2	0,1031
	5,5	RA160MB8	112	730	84,0	0,71	14	4,8	1,8	2,2	0,1156
	7,5	RA160L8	131	730	85,0	0,73	18	5,5	1,8	2,4	0,1443
180	11,0	RA180L8	145	730	87,0	0,75	26	5,5	1,8	2,4	0,1897
200	15,0	RA200L8	202	730	88,0	0,80	34	5,7	2,0	2,5	0,3600
225	18,5	RA225S8	250	730	88,5	0,80	40	6,0	1,8	2,8	0,4500
	22,0	RA225M8	290	730	89,5	0,80	47	6,5	1,8	2,8	0,5200
Синхронная частота вращения 3000 об/мин (два полюса)											
71	0,75	A71A2	9	2840	77,0	0,87	2	5,5	2,0	2,2	0,0006
	1,1	A71B2	10	2840	77,5	0,87	3	5,5	2,0	2,2	0,0008
80	1,5	A80A2	12	2865	80,0	0,88	3	7,0	2,9	3,5	0,0011
	2,2	A80B2	14	2855	82,5	0,89	5	7,0	2,9	3,5	0,0018
90	3,0	A90L2	17	2835	82,0	0,86	6	6,5	2,9	3,2	0,0024
100	4,0	A100S2	36	2880	86,5	0,89	8	7,5	2,0	2,2	0,0070
	5,5	A100L2	42	2880	87,5	0,91	10	7,5	2,0	2,2	0,0080
112	7,5	A112M2	49	2895	87,0	0,89	15	7,0	2,5	3,2	0,0185
132	11,0	A132M2	54	2865	87,0	0,88	21	7,0	2,3	3,0	0,0227
160	15,0	АИР160S2	116	2940	90,0	0,86	29	7,5	2,0	3,2	0,0788
	18,5	АИР160M2	130	2940	90,0	0,88	35	7,5	2,0	3,2	0,0976

Продолжение табл. 26.6

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	cos φ	Ток при 380 В, А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Момент инерции, кг·м^2
180	22,0	A180S2	160	2920	89,5	0,88	42	7,0	1,7	2,7	0,0604
	30,0	A180M2	185	2920	90,5	0,90	53	7,0	1,7	2,7	0,0704
200	37,0	A200M2	250	2900	90,0	0,90	69	7,5	2,0	2,5	0,1400
	45,0	A200L2	280	2900	90,0	0,90	84	7,5	2,0	2,5	0,1600
225	55,0	A225M2	255	2900	91,0	0,90	102	7,5	2,0	2,5	0,2000
250	75,0	A250S2	500	2970	93,0	0,91	130	7,0	2,0	2,7	0,2900
	90,0	A250M2	600	2970	93,0	0,91	160	7,0	2,0	2,7	0,2900
Синхронная частота вращения 1500 об/мин (четыре полюса)											
71	0,55	A71A4	9	1420	77,0	0,80	2	5,5	2,5	2,6	0,0010
	0,75	A71B4	10	1420	78,0	0,80	2	5,5	2,3	2,8	0,0015
80	1,1	A80A4	12	1395	75,0	0,81	3	5,5	2,0	2,2	0,0028
	1,5	A80B4	14	1395	78,0	0,83	4	5,5	2,0	2,2	0,0034
90	2,2	A90L4	19	1390	78,0	0,82	5	5,0	2,2	2,6	0,0056
100	3,0	A100S4	36	1440	82,0	0,83	7	6,5	1,6	2,0	0,0100
	4,0	A100L4	42	1440	84,0	0,84	9	6,0	1,6	2,0	0,0130
112	5,5	A112M4	49	1460	87,0	0,85	11	7,0	2,4	3,0	0,0236
132	7,5	A132S4	55	1455	88,0	0,83	15	7,0	2,8	3,2	0,0227
	11,0	A132M4	60	1430	87,0	0,88	22	7,0	2,4	2,7	0,0349
160	15,0	АИР160S4	125	1460	90,0	0,87	29	7,0	1,9	2,9	0,0963
	18,5	АИР160M4	142	1460	90,5	0,89	35	7,0	1,9	2,9	0,1200
180	22,0	A180S4	175	1470	90,0	0,90	41	7,0	1,4	2,2	0,1300
	30,0	A180M4	195	1470	91,0	0,90	56	7,0	1,4	2,2	0,1350
200	37,0	A200M4	270	1450	90,0	0,90	69	7,5	2,0	2,5	0,1500
	45,0	A200L4	310	1450	90,0	0,90	84	7,5	2,0	2,5	0,1800
225	55,0	A225M4	355	1470	92,5	0,90	100	7,0	2,0	2,5	0,2000
250	75,0	A250S4	500	1470	93,0	0,91	130	7,0	2,0	2,7	0,2900
	90,0	A250M4	600	1470	93,0	0,91	160	7,0	2,0	2,7	0,2900
Синхронная частота вращения 1000 об/мин (шесть полюсов)											
71	0,37	A71A6	9	920	64,5	0,69	1	4,0	2,0	2,2	0,0015
	0,55	A71B6	10	920	67,5	0,71	2	4,0	2,0	2,2	0,0020
80	0,75	A80A6	14	935	71,0	0,70	2	4,0	2,0	2,5	0,0035
	1,1	A80B6	16	925	72,0	0,72	3	4,0	1,9	2,4	0,0048
90	1,5	A90L6	18	920	75,0	0,73	3	6,0	2,0	2,2	0,0066
100	2,2	A100L6	42	950	81,0	0,73	6	5,5	2,0	2,2	0,0200
112	3,0	A112MA6	50	955	83,0	0,76	7	5,0	1,9	2,6	0,0380
	4,0	A112MB6	55	950	84,0	0,76	9	6,0	1,9	2,6	0,0425
132	5,5	A132S6	51	940	83,0	0,76	13	5,0	1,8	2,4	0,0500
	7,5	A132M6	61	940	83,7	0,79	17	5,0	2,0	2,4	0,0597
160	11,0	АИР160S6	125	975	88,5	0,82	23	6,5	2,2	2,9	0,1420
	15,0	АИР150M6	155	975	89,0	0,82	31	7,0	2,3	3,0	0,2500

Окончание табл. 26.6

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	cos φ	Ток при 380 В, А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Момент инерции, кг·м²
180	18,5	A180M6	174	975	88,0	0,87	37	6,0	1,2	2,0	0,300
200	22,0	A200M6	200	975	89,0	0,84	45	7,2	2,1	3,4	0,3600
	30,0	A200L6	280	975	89,5	0,86	59	6,5	2,0	2,7	0,5100
Синхронная частота вращения 750 об/мин (восемь полюсов)											
112	2,2	A112MA8	44	710	79,5	0,72	6	4,5	1,8	2,3	0,0221
	3,0	A112MB8	49	710	80,5	0,73	8	4,5	1,8	2,4	0,288
132	4,0	A132S8	68	720	83,0	0,70	10	6,0	1,8	2,2	0,0690
	5,5	A132M8	82	715	84,0	0,74	14	6,0	1,8	2,2	0,0935
160	7,5	АИР160S8	125	730	86,0	0,73	18	5,5	1,8	2,4	0,1265
	11,0	АИР160M8	150	730	87,0	0,75	26	6,5	1,8	2,4	0,2500
180	15,0	A180M8	195	730	87,0	0,82	32	6,0	1,2	2,2	0,2600
200	18,5	A200M8	180	730	88,5	0,80	40	6,0	1,8	2,8	0,2807
	22,0	A200L8	220	730	89,5	0,80	47	6,5	1,8	2,8	0,3070

Таблица 26.7. Технические данные двигателей серии АТД4 (U = 6000 В)

Мощность, кВт	Ток статора, А	КПД, %	cos φ	$M_{пуск}/M_{ном}$	$I_{пуск}/I_{ном}$	Масса, кг
500	56,5	95,7	0,89	0,9	5,1	1 930
630	72	95,7	0,88	1	5,3	2 660
800	90	96	0,89	1	5,3	2 820
1000	112,5	96,1	0,89	1	5,3	3 030
1250	140	96,4	0,89	0,95	5,5	3 970
1600	179	96,6	0,89	0,9	5,2	4 270
2000	226	96,7	0,88	0,77	4,7	5 560
2500	279	97	0,89	0,85	5	6 160
3150	346	97,2	0,9	0,9	5,3	7 010
4000	444	97,3	0,89	0,9	5,7	10 100
5000	548	97,5	0,9	0,9	5,7	11 000
6300	690	97,6	0,9	0,95	5,9	12 300
8000	876	97,6	0,9	0,95	6	12 320

АД большой мощности выпускаются несколькими сериями от 200 до 8000 кВт.

Асинхронные турбодвигатели серии АТД4 выпускаются мощностью от 500 до 8000 кВт, частотой вращения 3000 об/мин, напряжением 6 кВ. Ротор короткозамкнутый (табл. 26.7)

АД серий А4, АК4, ДА304 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения. Мощность АД этих серий от 200 до 1000 кВт.

АД вертикального исполнения серий ВАК3, ВАН выпускаются мощностью от 315 до 2500 кВт.

Двигатели с фазным ротором предназначены для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска и механизмов, требующих регулирования частоты вращения. АД серий АОК2-560, АОК2-630, АКСБ выпускаются мощностью до 1000 кВт.

В кратком обзоре выпускаемых электропромышленностью АД нет возможности дать информацию о многих сериях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

26.1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебн. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

26.2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебн. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1994.

26.3. Проектирование электрических машин: Учебн. для вузов. В 2 кн. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1993.

26.4. Справочник по электрическим машинам / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. В 2 т. М.: Энергоатомиздат, 1988 и 1989.

Раздел 27

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

27.1. Принцип действия синхронной машины 187
27.2. Назначение и области применения синхронных машин 188
27.3. Конструкция синхронных машин . . . 190
Явнополюсные синхроиные машины (192). Неявнополюсные синхронные машины (195).
27.4. Система возбуждения синхронных машин 198
27.5. Параметры обмотки якоря 200
27.6. Электромагнитные процессы в синхронной машине при холостом ходе 201
Форма кривых напряжения и индукцин магнитного поля при холостом ходе (201). Расчет магнитной цепи при холостом ходе. Характеристика холостого хода (201).
27.7. Электромагнитные процессы в синхронной машине при нагрузке 203
Электромагнитные процессы в неявнополюсной синхронной машине при нагрузке (203). Электромагнитные процессы в явнополюсной синхронной машине при нагрузке (204). Построение векторных диаграмм синхронных машин в режиме двигателя (206).
27.8. Характеристики синхронного генератора при работе на автономную нагрузку . . 207
27.9. Симметричное (трехфазное) короткое замыкание на выводах машины 207
27.10. Работа синхронной машины параллельно с мощной электрической сетью . . . 208
27.11. Общие сведения о синхронных машинах большой и средней мощности . . . 208
27.12. Турбогенераторы 211
27.13. Гидрогенераторы 211
27.14. Синхронные компенсаторы 216
27.15. Синхронные генераторы и двигатели общего назначения 216
27.16. Перспективные типы крупных синхронных машин 222

27.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Синхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, одна из обмоток которой присоединена к электрической сети с постоянной частотой f, вторая возбуждается постоянным током.

Наибольшее распространение получили синхронные машины с трехфазной разноименнополюсной p-пернодной обмоткой на статоре (якоре) и с разноименнополюсной p-периодной обмоткой возбуждения на роторе (индукторе) (рис. 27.1, *а*).

Машины этого исполнения называют просто "синхронными машинами", в то время как синхронные машины иных исполнений относятся к "специальным синхронным машинам".

Синхронные машины небольшой мощности иногда изготавливаются в обращенном исполнении с обмоткой возбуждения на статоре и с трехфазной обмоткой на роторе (рис. 27.1, *б*).

Оба исполнения в электромагнитном отношении равноценны, однако для крупных синхронных машин предпочтительнее основное исполнение (см. рис. 27.1, *а*), так как в этом случае с помощью скользящего контакта подводится мощность возбуждения, составляющая 0,3÷2% преобразуемой мощности, а не полная мощность, как в обращенном исполнении.

Трехфазная обмотка переменного тока называется иногда в синхронных машинах якорной обмоткой. Соответственно часть машины, несущая якорную обмотку, называется якорем; часть машины, несущая обмотку возбужденнн, — индуктором. В основном исполнении статор является якорем, ротор — индуктором, в обращенном исполнеиии — наоборот.

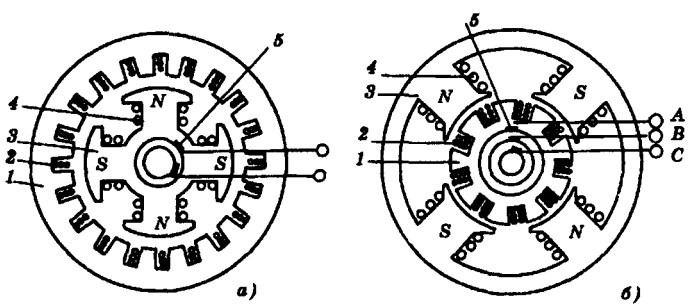


Рис. 27.1. Возможные исполнения синхронной машины

а — основное; *б* — обращенное; *1* — магнитопровод якоря; *2* — якорная трехфазная обмотка; *3* — магнитопровод индуктора; *4* — обмотка возбужденнн; *5* — токосъемное устройство

В синхронных машинах небольшой мощности для образования поля возбуждения часто используются постоянные магниты.

При работе синхронной машины в качестве генератора возбужденный ротор приводится во вращение с частотой n внешним механическим вращающим моментом (например, моментом гидравлической или паровой турбины). Ток обмотки возбуждения I_f создает магнитодвижущую силу (МДС) F_f и магнитный поток, неподвижный относительно полюсов и замыкающийся через сердечник статора. Вращающимся потоком возбуждения в обмотке статора индуктируется ЭДС частотой $f = pn/60$. Электродвижущие силы фаз трехфазной обмотки взаимно смещены во времени на электрический угол 120°. Если к обмотке статора присоединить симметричную нагрузку, то под действием ЭДС в ней и во внешней цепи будет протекать симметричная система токов I_A, I_B, I_C, которые создают МДС якоря F_a и магнитное поле, вращающееся со скоростью $\Omega = 2\pi f/p$, т.е. синхронно с ротором (здесь p — число периодов магнитного поля). МДС якоря $\underline{F}_a$ может быть разложена по направлениям продольной d и поперечной q осей ротора ($\underline{F}_a = \underline{F}_d + \underline{F}_q$). Результирующий вращающийся магнитный поток Ф образуется в результате совместного действия взаимно неподвижных МДС $\underline{F}_f$ и $\underline{F}_a$ (рис. 27.2).

В результате взаимодействия потока Ф с током обмотки якоря возникает электромагнитный момент $M \sim \Phi I \cos\varphi$, где $I = I_A = I_B = I_C$; φ — угол сдвига фаз напряжения $\underline{U}$ и тока $\underline{I}$ генератора. В генераторном режиме электромагнитный момент действует навстречу внешнему вращающему моменту, т.е. является тормозящим.

При работе синхронной машины в качестве двигателя обмотка статора подключается к трехфазной сети переменного тока, а обмотка ротора — к источнику постоянного тока. Обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. В результате взаимодействия этого поля с полем обмотки возбуждения возникает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор вращается с синхронной частотой. В установившемся режиме электромагнитный момент уравновешивается внешним тормозящим механическим моментом.

Равенство частот вращения магнитного поля и ротора принципиально характерно для рассматриваемых машин и послужило причиной наименования их синхронными.

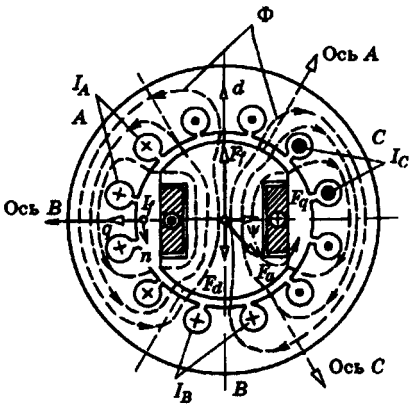


Рис. 27.2. К объяснению принципа действия трехфазной синхронной машины ($2p = 2$)

27.2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Синхронные машины используются в промышленности. Основная область их применения — преобразование механической энергии в электрическую энергию. Преобладающая часть электрической энергии, используемой в народном хозяйстве и в бытовых целях, производится с помощью *синхронных трехфазных турбогенераторов и гидрогенераторов*. Первые приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, вторые — гидротурбинами.

Синхронные генераторы с приводом от других типов двигателей (дизельных, внутреннего сгорания, поршневых, паровых и др.) выполняются на небольшую мощность для питания автономных нагрузок.

Синхронные машины применяются также и в качестве *двигателей*, особенно в крупных установках (привод поршневых компрессоров, воздуходувок, гидравлических насосов), так как в отличие от асинхронных двигателей они способны генерировать, а не потреблять реактивную мощность. Большое распространение получили также синхронные микродвигатели (особенно синхронные микродвигатели с постоянными магнитами).

Обычно синхронные машины рассчитываются таким образом, чтобы они могли генерировать реактивную мощность, примерно равную активной мощности (соответственно около 0,6 и около 0,8 полной мощности). В ряде случаев оказывается выгодным устанавливать около крупных промышленных центров синхронные машины, предназначенные исключительно для генерирования реактивной мощности. Эти синхронные машины называются *синхронными компенсаторами*.

Согласно общему стандарту на электрические машины (ГОСТ 183-74), а также стандартам на *турбогенераторы* (ГОСТ 533-68), *гидрогенераторы* (ГОСТ 5616-72) и синхронные компенсаторы (ГОСТ 609-75) к числу номинальных данных синхронной машины, указываемых на табличке, относятся:

а) номинальная мощность (для генераторов и синхронных компенсаторов — полная электрическая мощность, кВ·А; для двигателей — механическая мощность на валу двигателя, кВт);

б) номинальный коэффициент мощности (при перевозбуждении);

в) номинальный КПД (только для двигателей);

г) схема соединения фаз обмотки статора;

д) номинальное линейное напряжение обмотки якоря (статора), В;

е) номинальная частота вращения, об/мин (для гидрогенераторов указывается еще и угонная частота вращения);

ж) номинальная частота тока якоря, Гц;

з) номинальный линейный ток якоря, А;

и) номинальные напряжение и ток обмотки возбуждения.

Все промышленные синхронные машины выполняются на стандартизированную частоту 50 Гц. Требуемая синхронная частота вращения n, об/мин (или угловая скорость Ω, рад/с), обеспечивается выбором соответствующего числа периодов обмоток:

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{2\pi f}{\Omega}.$$

Числа периодов обмоток для некоторых возможных частот вращения приведены ниже:

p	1	2	3	4
n, об/мин	3000	1500	1000	750
p	8	16	32	64
n, об/мин	375	187,5	93,7	46,9

В зависимости от мощности турбины и напора воды частота вращения гидрогенераторов колеблется в пределах 50÷600 об/мин. Большие частоты вращения относятся к высоконапорным ГЭС с турбинами небольшой мощности, меньшие частоты — к низконапорным ГЭС с крупными турбинами.

Турбогенераторы, как правило, выполняются на частоту вращения 3000 об/мин и имеют соответственно число периодов $p = 1$. При $p = 2$ изготавливаются турбогенераторы для атомных электростанций (АЭС), где при имеющихся параметрах пара иногда не удается получить частоту вращения турбины более 1500 об/мин.

Особенности условий работы гидрогенератора и турбогенератора накладывают отпечаток на конструкцию этих машин.

Гидрогенераторы (рис. 27.3) выполняются преимущественно с вертикальной осью вращения. Турбина располагается под гидрогенератором, и ее вал, несущий рабочее колесо, сопрягается с валом генератора с помощью фланцевого соединения. Так как частота вращения мала, а число полюсов велико, ротор генератора выполняется с большим диаметром и сравнительно малой активной длиной. Обычно ротор имеет явнополюсное исполнение (см. ниже). Активные части у этой тихоходной машины занимают сравнительно малую долю ее общего объема. Большую часть объема занимают конструктивные части: опорный подшипник—подпятник, воспринимающий массу вращающихся частей генератора и турбины; направляющие подшипники, придающие оси ротора определенное положение в пространстве; верхняя и нижняя крестовины, несущие на себе подпятник и подшипники, корпус статора, остов ротора, воздухоохладители, маслоохладители и др.

Гидроагрегаты, объединяющие турбину и гидрогенератор, являются крупнейшими из используемых в промышленности машин. Их мощность достигает 200—600 МВ·А, высота 20—30 м. Гидрогенераторы, изготовленные для Саяно-Шушенской ГЭС, являются самыми мощными в мире. Они имеют мощность 715 МВ·А при частоте вращения 143 об/мин. Внешний диаметр генератора около 15 м, диаметр его ротора около 12 м, длина магнитопровода статора 2,75 м.

Турбогенераторы, наоборот, почти всегда выполняются с горизонтальной осью вращения. Диаметр ротора турбогенератора значительно меньше, чем его активная длина, ротор обычно имеет неявнополюсное исполнение (см. ниже). Предельный диаметр ротора при частоте вращения 3000 об/мин по условиям механической прочности составляет 1,2÷1,25 м. Активная длина ротора по условиям механической жесткости не превышает 6,5 м.

Характерное для генераторостроения постоянное стремление к увеличению мощности в единице реализуется применительно к турбогенераторам главным образом за счет внедрения более интенсивных способов охлаждения без заметного увеличения габаритных размеров. Турбогенераторы мощностью 800÷1000 МВт, построенные в 70-е годы, имеют практически такие же габаритные размеры, как турбогенераторы мощностью 100 МВт, выпускавшиеся в 40-е годы, и отличаются от последних только тем, что в них применяется непосредственное охлаждение проводников обмоток водородом при давлении до $5 \cdot 10^5$ Па, дистиллированной водой или маслом.

В России освоен серийный выпуск турбогенераторов мощностью до 800 МВт.

Синхронные двигатели выпускаются серийно мощностью от 100 кВт до нескольких десятков тысяч киловатт на частоты вращения от 3000 до 100 об/мин. При частотах вращения 3000, 1500 об/мин двигатели выполняются с неявнополюсными роторами и их конструкция близка к конструкции турбогенератора; при частотах вращения 1000 об/мин и менее двигатели выполняются с явнополюсными роторами и их конструкция близка к конструкции гидрогенератора при вертикальном исполнении или дизель-генератора при горизонтальном исполнении.

Освоен также серийный выпуск синхронных микродвигателей различных типов в широком диапазоне частот вращения (от нескольких оборотов в минуту до 3000 об/мин) и мощностей (от долей ватта до нескольких сотен ватт).

На гидроаккумулирующих электростанциях применяются обратимые гидрогенераторы-двигатели. Приводя в движение насос, перекачивающий воду в верхний резервуар, обратимые машины работают в режиме двигателя. Наоборот, приводимые в движение турбиной, в которую поступает вода из верхнего резервуара, эти машины работают в режиме генератора. Мощность обратимых машин может достигать 200÷300 МВт.

Синхронные компенсаторы выпускаются мощностью от 15 до 160 МВ·А при частотах вращения 750÷1000 об/мин. Ротор этих машин имеет явнополюсное исполнение. Охлаждение обычно водородное.

В зависимости от мощности и частоты вращения номинальное напряжение обмотки якоря (статора) синхронных машин выбирается из числа стандартных напряжений: 0,23; 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75 кВ (для генераторов) и 0,22; 0,38; 3; 6; 10 кВ (для двигателей). Номинальное напряжение обмотки возбуждения выбирается в пределах 24÷400 В.

С ростом мощности и частоты вращения КПД машины увеличивается. При мощности 100÷4000 кВ·А

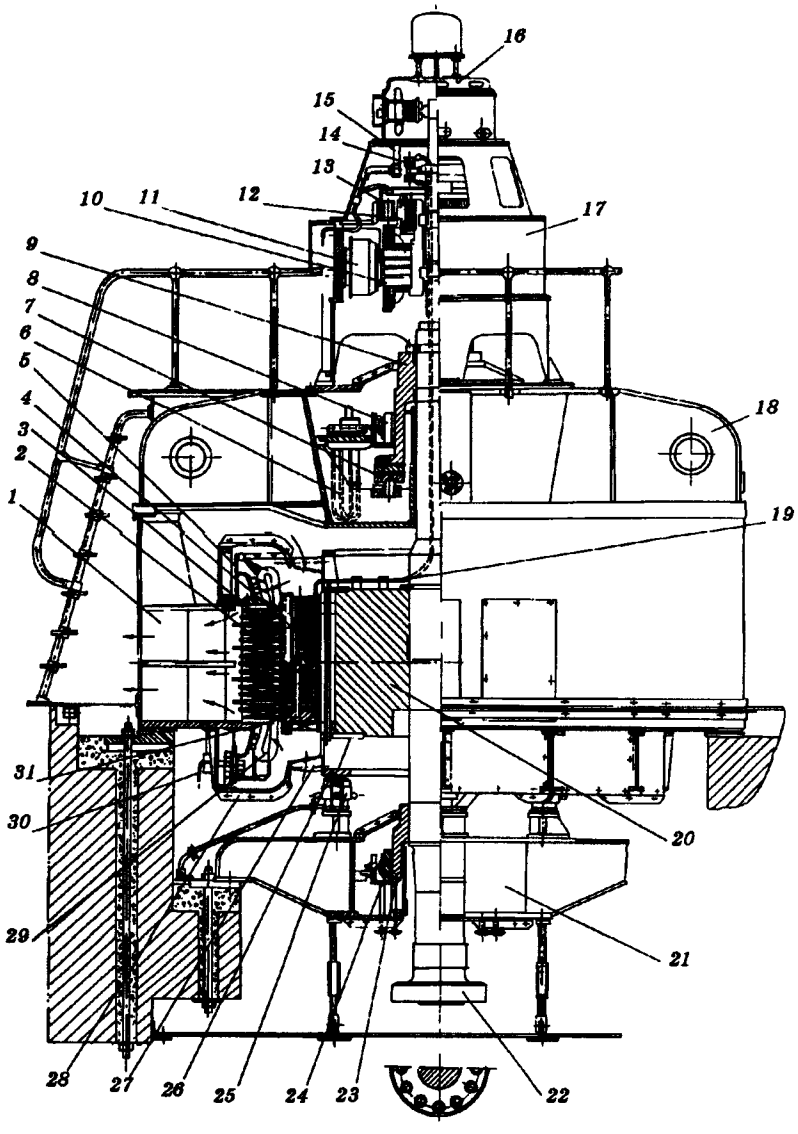


Рис. 27.3. Явнополюсная синхронная машина (гидрогенератор) с косвенным воздушным охлаждением

1 — станина; *2* — полюс ротора; *3* — пакет магнитопровода статора; *4* — катушка обмотки возбуждения; *5* — кронштейн для крепления обмотки; *6* — маслоохладитель; *7* — сегмент подпятника; *8* — сегмент верхнего направляющего подшипника; *9* — втулка подпятника и направляющего подшипника; *10* — якорь возбудителя; *11* — полюс возбудителя с обмоткой; *12* — коллектор возбудителя; *13* — щеточное устройство возбудителя; *14* — контактные кольца машины; *15* — щеточное устройство контактных колец; *16* — регуляторный генератор; *17* — станина возбудителя; *18* — верхняя крестовина; *19* — соединительные шины между обмоткой возбуждения машины и контактными кольцами; *20* — обод ротора; *21* — нижняя крестовина; *22* — вал; *23* — втулка нижнего направляющего подшипника; *24* — сегмент нижнего направляющего подшипника; *25* — тормоз; *26* — тормозное кольцо ротора; *27* — осевой вентилятор; *28* — воздухоразделительный щит; *29* — катушка обмотки статора; *30* — выводы обмотки статора; *31* — нажимная щека полюса

он составляет 0,9÷0,95; в гидрогенераторах и турбогенераторах большой мощности он достигает 0,97÷0,99.

В настоящее время существует большое многообразие синхронных электрических машин, отличающихся по назначению, области применения, а следовательно, и по конструктивному исполнению. Основные, наиболее распространенные типы синхронных машин указаны в табл. 27.1 и 27.2.

27.3. КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Конструкция синхронной машины и, в первую очередь, конструкция ее ротора существенным образом зависят от заданной частоты вращения[1]. При

[1] Конструкция синхронных машин рассматривается здесь применительно к крупным синхронным машинам.

Таблица 27.1. Синхронные генераторы (основные типы)

Название	Описание
Турбогенераторы	Неявнополюсные машины, предназначенные для сопряжения с паровыми или газовыми турбинами. Обычно двухполюсные с частотой вращения 3000 об/мин и мощностью до 1200 МВт. При мощности до 12 МВт выпускаются с воздушным охлаждением, при больших мощностях — с водородным. В турбогенераторах мощностью более 100 МВт применяется непосредственное охлаждение проводов обмоток водородом при избыточном давлении до 0,4 МПа, дистиллированной водой или трансформаторным маслом
Гидрогенераторы	Явнополюсные машины, предназначенные для сопряжения с гидравлическими турбинами. Обычно многополюсные с частотами вращения от 50 до 500 об/мин (иногда до 1000 об/мин) мощностью до 700 МВ · А. Рассчитаны на угонную частоту вращения, равную 1,8÷3,5 номинальной
Синхронные компенсаторы	Трехфазные синхронные машины, предназначенные для генерирования реактивной мощности. Обычно явнополюсные с частотами вращения 750÷1000 об/мин. При мощности до 25 МВ · А выполняются с воздушным охлаждением, при больших мощностях — с водородным
Трехфазные синхронные генераторы общего назначения	Предназначены для сопряжения с поршневыми двигателями. Рассчитаны на угонную частоту вращения, равную 1,2 номинальной. Выполняются мощностью от нескольких киловатт до нескольких десятков тысяч киловатт при частотах вращения от 100 до 1500 об/мин
Индукторные генераторы	Однофазного или трехфазного тока с расположением обмоток переменного и постоянного тока только на статоре. Выпускаются мощностью до нескольких сотен киловатт. При частотах вращения 1500÷3000 об/мин дают возможность получить ток частотой 2000÷10 000 Гц (иногда до 50 000 Гц). Применяются для высокочастотного нагрева и других целей
Генераторы с постоянными магнитами	Обычно трехфазные без обмотки возбуждения (иногда с обмоткой, образующей дополнительное подмагничивание). При частотах вращения 5000÷25 000 об/мин выполняются мощностью от нескольких ватт до 10 кВт и более
Однофазные синхронные генераторы	Выполняются мощностью в несколько килоавтт (иногда для целей электрической тяги мощностью 50 000 кВт). При одинаковых главных размерах мощность однофазного генератора составляет около 70% мощности трехфазного генератора при меньшем КПД

Таблица 27.2. Синхронные двигатели (основные типы)

Название	Описание
Трехфазные синхронные двигатели	Выпускаются на мощность от 30 кВт до нескольких десятков тысяч киловатт при частотах вращения от 100 до 1000 об/мин в явнополюсном исполнении и 1500, 3000 об/мин — в неявнополюсном исполнении. Имеют вентильную или электромашинную систему возбуждения. Коэффициент мощности обычно 0,9 (при перевозбуждении). Имеют на роторе дополнительную короткозамкнутую обмотку, позволяющую осуществлять асинхронный пуск
Реактивные синхронные двигатели	Самые распространенные синхронные двигатели небольшой мощности (от долей ватта до нескольких киловатт). Выпускаются в трехфазном и однофазном (конденсаторном) исполнении. Не имеют обмотки возбуждения на роторе
Асинхронизированные синхронные двигатели	По конструкции напоминают асинхронные двигатели с фазным ротором. Имеют две обмотки на роторе, которые в асинхронном режиме питаются токами частоты скольжения. В результате машина не выпадает из синхронизма. Применяются для работы с тяжелыми условиями пуска и эксплуатации
Гистерезисные синхронные двигатели	Выпускаются в трехфазном или однофазном исполнении без обмоток возбуждения мощностью до 500 Вт. Обладают хорошими пусковыми свойствами. Работают бесшумно. Могут иметь несколько синхронных частот вращения
Двигатели с постоянными магнитами	Выпускаются в трехфазном или однофазном исполнении без обмотки возбуждения на роторе мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт. Имеют высокие КПД и $\cos\varphi$
Двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения	Принцип действия основан на взаимодействии зубцовых гармоник поля. Позволяет получать низкие частоты вращения. Применяются в устройствах автоматики и при использовании источников питания повышенной частоты
Шаговые двигатели	Питаются импульсами электрического напряжения, под воздействием которых совершают угловое или линейное перемещение на размер шага. Применяются в системах автоматического регулирования

$n < 1500$ об/мин и соответственно при $p > 2$, т.е. в гидрогенераторах, синхронных компенсаторах и тихоходных двигателях, применяется *явнополюсное исполнение ротора*. Машина с таким ротором называется *явнополюсной*. При $n = 3000$ (1500) об/мин и соответственно $p = 1$ (2), т.е в турбогенераторах и турбодвигателях, применяется *неявнополюсное исполнение ротора* и машина называется *неявнополюсной*.

ЯВНОПОЛЮСНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Конструктивную компоновку *явнополюсной синхронной машины* рассмотрим на примере вертикального гидрогенератора с косвенным охлаждением, показанного в разрезе на рис. 27.3.

Статор синхронной машины не отличается по своему устройству от статора асинхронной машины. При наружном диаметре магнитопровода статора менее 1 м последний набирается из цельных кольцевых пластин электротехнической стали. При наружном диаметре магнитопровода статора более 1 м, т.е в большинстве синхронных машин, каждый кольцевой слой магнитопровода набирается из многих пластин, называемых сегментами.

Сегменты (рис. 27.4) штампуются из листовой или рулонной электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На наружной поверхности ярма сегмента предусматриваются специальные выемки, с помощью которых осуществляется крепление сегментов в конструктивных частях. Из двух возможных исполнений сегментов по рис. 27.4 предпочтительнее исполнение по рис. 27.4, *а*, в котором все зубцы сегмента обладают одинаковой прочностью и вибростойкостью.

Магнитопровод статора из сегментов *3* (см. рис. 27.3) собирается на клиньях станины *1*, которые входят в углубления сегментов в виде ласточкиных хвостов. Крепление клина *1* к станине *2* показано на рис. 27.5. Другой вариант конструкции крепления клина *7* к станине *1* с помощью косынок *8* приведен на рис. 27.6. В осевом направлении пакет магнитопровода *6* прессуется с помощью нажимных сегментов *4*, сквозных шпилек *3* и гаек *2*, стягивающих эти сегменты. Шпильки располагаются между клиньями *7*, поэтому на разрезе, сделаином по клину, шпильки видны на заднем плане. Нажимной сегмент *4* и вентиляционный сегмент *5*, необходнмый для образования радиальных каналов в магнитопроводе, показаны рядом с разрезом статора в аксонометрии. Пластиины *9* крепят шпильки *3* к стаиине и предотвращают их вибрацию.

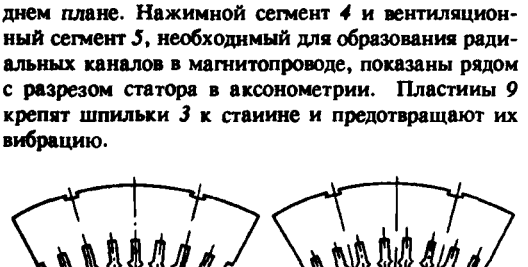


Рис. 27.4. Сегменты магнитопровода статора
а — с краями по середине пвза; *б* — с краями по середине зубца

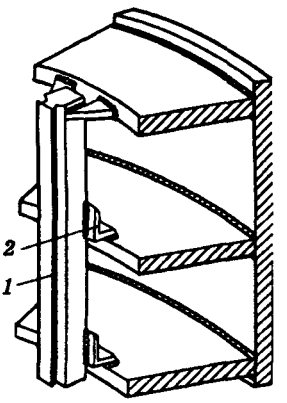


Рис. 27.5. Приварка клиньев к кольцам станины

Пазы магнитопровода статора выполняются, как правило, открытыми. В них укладывается трехфазная разноименнополюсная обмотка *29* (см. рис. 27.3).

В крупных явнополюсных синхронных машннах, рассчитанных на напряжение 3 кВ и более, применяются двухслойные обмотки двух типов: многовитковые петлевые катушечные (два—шесть витков) и волновые стержневые (одновитковые). Конструкция пазовой изоляции катушечной многовитковой (*а*) и стержневой (*б*) обмоток представлена на рис. 27.7. Виток или стержень обмотки состоит из четного числа элементарных изолированных проводников прямоугольного сечения, расположенных в два ряда по ширине паза. Для уменьшения добавочных потерь в катушечных обмотках транспонируют выводные концы катушек и межгрупповые соединения, в стержневых обмотках — элементарные проводники в пазовой части обмотки.

В многовитковой катушечной обмотке (см. рис. 27.7, *а*) витки, состоящие из одного или нескольких проводников *1*, изолируются один от другого с помощью витковой изоляции *2*. Для изоляции витков катушки от заземленных частей служит корпусная изоляция *3*. В стержневой обмотке (см. рис. 27.7, *б*) корпусная изоляция *3* служит одновременно и витковой изоляцией. Изоляционная прокладка *2* отделяет соседние ряды элементарных проводников, напряжение между которыми очень мало (на два порядка меньше виткового). С целью уменьшения напряженности электрического поля в воздушных промежутках между корпусной изоляцией и магнитопроводом применяется полупроводящее изоляционное покрытие *4*. Стержни (катушки) закрепляются в пазах с помощью немагнитных составных клиньев из изоляционного материала, которые забиваются в специальные углубления в стенках пазов (поз. *7* на рис. 27.7). Под клинья, между слоямн и на дно паза помещаются изоляционные прокладки *5*, *6*, *8*, толщина которых подбирается по месту так, чтобы зазор между клином и обмоткой отсутствовал.

Лобовые части *5* (рис. 27.8) укрепляются с помощью дистанционных распорок *2*, располагающихся между соседними стержнями, и бандажных колец *1*, охватывающих лобовые части снаружи.

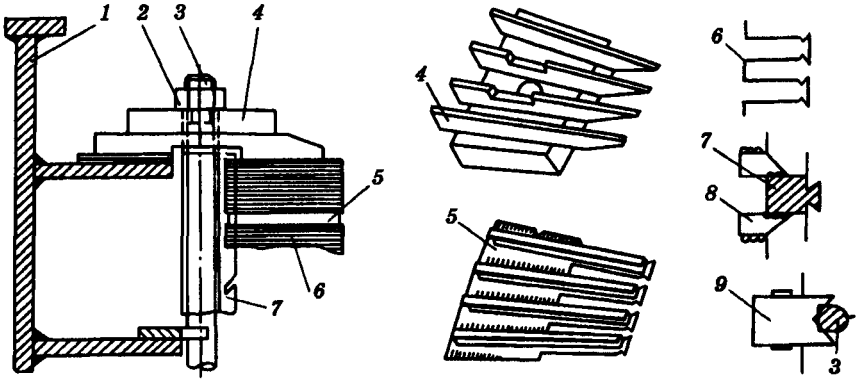


Рис. 27.6. Крепление магнитопровода из сегментов в станине статора

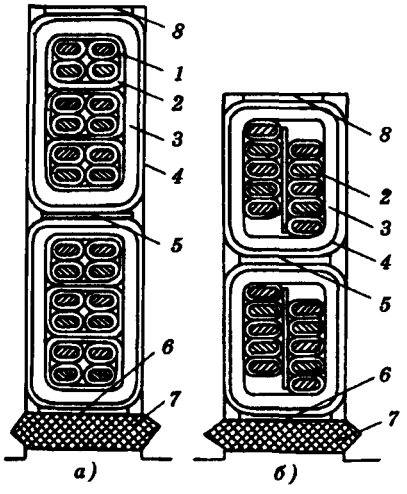


Рис. 27.7. Разрезы пазов магнитопровода с уложенной в них двухслойной катушечной (*а*) и двухслойной стержневой (*б*) обмотками

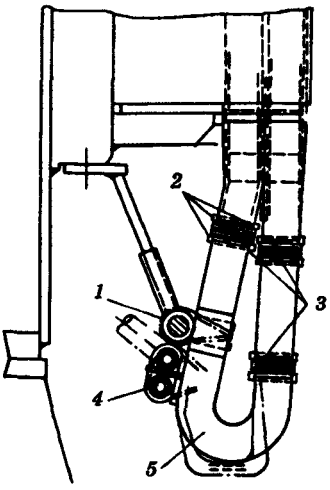


Рис. 27.8. Крепление лобовой части обмотки статора

Для стягивания соседних стержней в зоне дистанционных распорок используется прочный шнур *3*; этим же шнуром стержни (или катушки) привязываются к бандажным кольцам. Соединения между катушками *4* крепятся с помощью шнура к лобовым частям (как на рис. 27.8) или к специальным кронштейнам, прикрепленным к станине (как на рис. 27.3).

Магнитопровод ротора синхронной явнополюсной машины, возбуждаемой постоянным током, может быть выполнен из ферромагнитных материалов сплошным или набранным из отдельных пластин, толщина которых определяется технологическими соображениями. В генераторе по рис. 27.3 полюсы набраны из стальных штампованных пластин толщиной 1,5 мм, обод (ярмо) ротора *20* выполнен массивным из стальной поковки и насажен на вал *22*. В отдельных случаях применяются массивные полюсы. Чаще всего обод ротора набирается из стальных пластин толщиной 2—6 мм (если пластины штампуются) и до 100 мм (если они вырезаются пламенем газовой горелки). Пластины стягиваются шпильками. При малом наружном диаметре (до 4 м) обод изготавливается из цельных кольцевых пластин и насаживается непосредственно на вал. При больших диаметрах обод собирается на стяжных шпильках из отдельных сегментов и крепится на остове *1*, как, например, в явнополюсном роторе, внешний вид которого показан на рис. 27.9. Для улучшения вентиляции машин, имеющих значительную осевую длину, обод выполняется разделенным на несколько пакетов, между которыми имеются каналы для прохождения охлаждающего воздуха к периферийным зонам ротора. Иногда (см. рис. 27.9) радиальные вентиляционные каналы *9* предусматриваются и в полюсах. Для того чтобы имелась возможность установить заранее изготовленные катушки *5* обмотки возбуждения на полюсы, имеющие меньшую ширину, чем полюсные наконечники, их (наконечники полюсов) или полюсы целиком необходимо делать отъемными. На рис. 27.10 приведена наиболее распространенная конструкция, в которой применены отъемные полюсы, набранные из пластин *1* листовой стали толщиной 1÷2 мм и стянутые в осевом направлении шпильками *10*. Крепление полюсов осуществляется

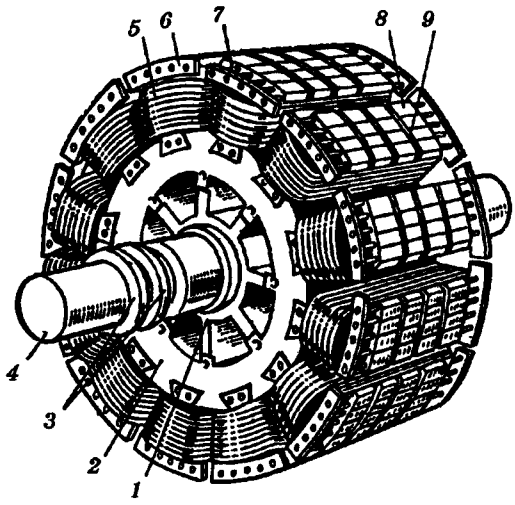


Рис. 27.9. Внешний вид явнополюсного ротора

1 — остов ротора; *2* — обод ротора; *3* — контактные кольца; *4* — вал; *5* — катушка обмотки возбуждения; *6* — сегмент демпферной обмотки; *7* — стержень демпферной обмотки; *8* — пакет сердечника полюса; *9* — вентиляционный канал в полюсе

с помощью Т-образных хвостов *11*, каждый из которых заклинивается двумя парами встречных стальных клиньев *2* прямоугольного сечения.

Важным элементом конструкции полюсов, набранных из листовой стали, являются нажимные щеки, которые необходимы для распределения сил запрессовки от стяжных шпилек *10* по всей поверхности штампованного листа полюса. Нажимные щеки *31*, имеющие форму пластины полюса, хорошо видны на продольном разрезе генератора (см. рис. 27.3).

Катушки обмотки возбуждения наматываются на ребро из голой шинной меди большого сечения (200÷800 мм^2).

После установки между соседними витками изоляционных прокладок *6*, пропитанных в термореактивной смоле, катушку прессуют и в таком виде запекают. Корпусная изоляция *4* накладывается на полюсы до установки катушек. Конструкция крепления катушки на полюсе ясна из рис. 27.10. Направленная вдоль оси полюса составляющая центробежной силы пазовых частей катушки воспринимается кромками полюсного наконечника, изолированными от катушки шайбой *3*.

Для предотвращения радиальных смещений катушки при малых частотах вращения в углублениях ярма размещаются пружины *14*, которые через стальную шайбу *12* и изоляционную шайбу *3* прижимают катушку к полюсному наконечнику. Нормальная к оси полюса составляющая центробежной силы может вызвать деформацию проводников катушки. Поэтому в быстроходных машинах с большой активной длиной иногда приходится устанавливать между катушками соседних полюсов одну или реже несколько равномерно распределенных по длине распорок *13*.

Центробежная сила лобовых (торцевых) частей катушки воспринимается козырьком нажимной щеки полюса (поз. *31* на рис. 27.3).

Обмотка возбуждения *4* (см. рис. 27.3) получает питание непосредственно от якоря возбудителя *10*. Щетки *13* возбудителя, контактирующие с коллектором возбудителя *12*, присоединяются с помощью АГП (см. §27.4) к щеточному устройству *15* контактных колец генератора, щетки которого через скользящий контакт связаны электрически с контактными кольцами обмотки возбуждения *14* и далее через шины *19*, уложенные в центральном отверстии вала, с выводами обмотки возбуждения.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей и компенсаторов, а также в большинстве генераторов устанавливается неравношаговая короткозамкнутая обмотка, называемая *демпферной обмоткой*. Стержни *7* (см. рис. 27.10) и короткозамыкающие элементы (сегменты *8* и перемычки *9* между сегментами) этой обмотки изготавливаются из меди. Для укладки стержней в полюсных наконечниках предусматриваются полузакрытые круглые пазы. Демпферная обмотка благоприятно влияет на протекание переходных процессов, связанных с изменением электромагнитных величин и частоты вращения (синхронизацию, изменение нагрузки и др.).

В синхронных двигателях и компенсаторах демпферная обмотка служит также для пуска в ход, выполняя такую же роль, как короткозамкнутая обмотка в асинхронных двигателях, и называется поэтому *пусковой обмоткой*. Хорошими свойствами в переходных процессах и при пуске обладает *продольно-поперечная демпферная обмотка* (см. рис. 27.10), сегменты которой объединены в общее короткоза-

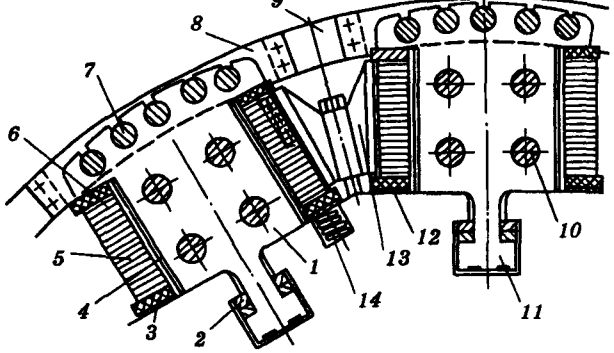


Рис. 27.10. Поперечный разрез явнополюсного ротора

1 — полюс; *2* — встречные клинья хвостового крепления; *3* — изоляционная шайба; *4* — корпусная изоляция полюса; *5* — голый проводник обмотки возбуждения; *6* — витковая изоляция проводников; *7* — стержень демпферной обмотки; *8* — сегмент демпферной обмотки; *9* — гибкая перемычка между сегментами; *10* — стяжная шпилька; *11* — хвост полюса Т-образной формы; *12* — стальная шайба; *13* — межполюсная распорка; *14* — пружина

мыкающее кольцо с помощью гибких перемычек. *Продольная демпферная обмотка*, в которой перемычки между сегментами отсутствуют (см. рис. 27.9), имеет существенно худшие свойства и применяется только в генераторах небольшой мощности.

В машинах с массивными полюсами демпферная обмотка не предусматривается, так как вихревые токи, индуктируемые в теле полюсов, создают необходимое демпфирование изменений поля в переходных процессах. Для увеличения демпфирующего действия вихревых токов торцы полюсных наконечников массивных полюсов объединяются электрически с помощью прифланцованных к ним медных сегментов и гибких перемычек, связывающих сегменты соседних полюсов. При таком конструктивном выполнении массивных полюсов и короткозамыкающих торцевых элементов свойства машины в переходных процессах получаются такими же, как при продольно-поперечной демпферной обмотке.

В гидрогенераторе по рис. 27.3 применено косвенное воздушное охлаждение. Направление движения воздуха показано на рисунке стрелками. Генератор имеет продуваемое исполнение с забором воздуха извне и с выбросом нагретого воздуха в машинный зал. Необходимый для движения воздуха напор создается осевыми вентиляторами *27*.

В явнополюсных синхронных компенсаторах большой мощности, например компенсаторах серии КСВ, применяется косвенное водородное охлаждение, которое дает возможность увеличить мощность компенсатора примерно в 1,3 раза по сравнению с воздушным охлаждением.

В последние годы в гидрогенераторах, особенно в машинах предельной мощности, получает применение непосредственное (внутреннее) охлаждение обмотки статора, обмотки ротора и сердечника статора.

Наиболее приемлемым для гидрогенератора является охлаждение дистиллированной водой. При тех же главных размерах мощность гидрогенератора с полным водяным охлаждением можно увеличить более чем в 2 раза по сравнению с косвенным охлаждением. Во столько же раз возрастает и предельная мощность гидрогенераторов.

НЕЯВНОПОЛЮСНЫЕ СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Неявнополюсное исполнение ротора характерно для двухполюсных и четырехполюсных синхронных машин с частотой вращения 3000 и 1500 об/мин.

Конструктивная компоновка типичной неявнополюсной синхронной машины — двухполюсного турбогенератора небольшой мощности с косвенным воздушным охлаждением — представлена на рис. 27.11. Магнитопровод ротора *2* изготавливается как единое целое с хвостовиками (концами вала) из одной стальной поковки (тело магнитопровода играет в активной зоне роль вала). Основные элементы неявнополюсного ротора — магнитопровод *3* и хвостовик *6* — видны на рис. 27.12.

Для обеспечения достаточной механической прочности элементов магнитопровода, воспринимающих центробежные силы, его изготавливают из наиболее прочных сталей, легированных хромом, никелем и молибденом. Как показано на поперечном и продольном разрезах ротора (рис. 27.13), на наружной цилиндрической поверхности тела магнитопровода фрезеруются пазы прямоугольной формы для катушек распределенной обмотки возбуждения *5*. Пазы равномерно распределяются в двух диаметрально противоположно размещенных зонах, каждая из которых охватывает 1/3 часть окружности. Между пазами в пределах этих зон образуются большие зубцы магнитопровода *2*. В центре ротора имеется осевой канал *4*.

Проводники и изоляция обмотки возбуждения быстроходных неявнополюсных машин испытывают действие больших центробежных сил и значительные термические напряжения. Поэтому для проводников *1* обмоток используется медь с присадкой серебра, имеющая повышенные механические прочностные свойства. Конструкция изоляции существенно зависит от способа охлаждения обмоток. При косвенном охлаждении (см. рис. 27.14) витковая изоляция проводников *2* выполняется в виде прокладок из миканита, закрепленных стеклолентой. В качестве корпусной изоляции пазовых частей катушек применяются пазовые коробки (гильзы), которые изготавливаются из миканита или стеклянной ткани *3* методом горячей прессовки в пресс-форме. Коробка имеет защитную оболочку *4* из стали. После укладки витков края коробки нагревают и загибают внахлест. Предварительно в паз поверх коробки укладывают миканитовые прокладки *5*, а непосредственно под клин — стальную пластину *6*. Клинья *7* изготавливают из дюралюминия, имеющего повышенные механические свойства.

Радиально направленные центробежные силы, действующие на пазовые части катушек возбуждения *5* (см. рис. 27.13), через клинья *8* передаются на зубцы *2*, *3* и воспринимаются ярмом магнитопровода *1*. Центробежные силы лобовых частей обмотки возбуждения передаются через изолирующие прокладки на сплошные массивные бандажные кольца *7* (см. рис. 27.11) или *9* (см. рис 27.13). В небольших турбогенераторах применяются бандажные кольца *7* (см. рис. 27.11) из легированной стали повышенной прочности, которые во избежание образования замкнутого магнитного контура вокруг лобовых частей отделены воздушным промежутком от магнитопровода и опираются только на центрирующее кольцо *11*, насаженное на хвостик ротора. В крупных турбогенераторах применяются бандажные кольца *9* (см. рис. 27.13) из немагнитной стали, опирающиеся и на зубцы магнитопровода *2*, *3*, и на центрирующее кольцо *10*.

Для подведения тока от возбудителя *16* (см. рис. 27.11) к выводам обмотки возбуждения *10* используется следующая цепочка электрически соединенных элементов: щетки возбудителя, АГП, щеточное устройство *13*, контактные кольца обмотки возбуждения *19*, соединительные шины *21*.

Статор неявнополюсной синхронной машины устроен так же, как в явнополюсной машине, и отличается лишь соотношениями между главными размерами. В небольших неявнополюсных машинах применяются петлевые обмотки, образованные из многовитковых (обычно двухвитковых) катушек

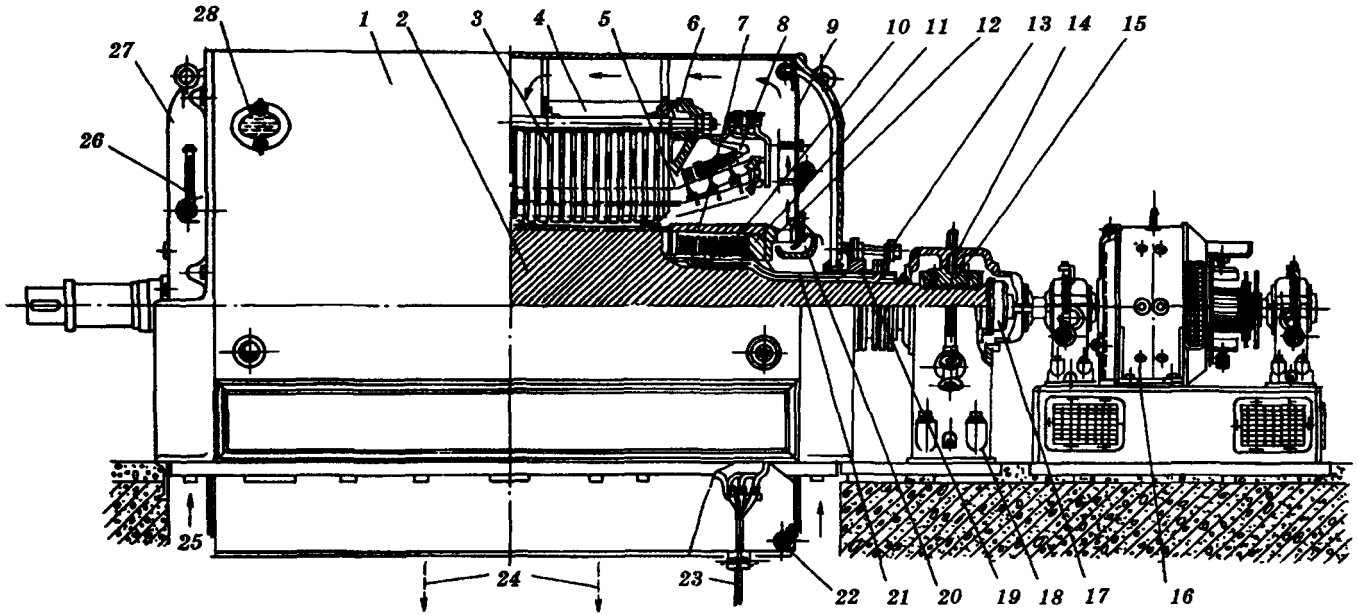


Рис. 27.11. Неявнополюсная синхронная машина (турбогенератор) с косвенным воздушным охлаждением

1 — корпус статора; *2* — магнитопровод ротора; *3* — пакет магнитопровода статора; *4* — стяжная шпилька; *5* — стержень (катушка) обмотки статора; *6* — нажимное кольцо; *7* — бандажное кольцо ротора; *8* — кронштейн для крепления обмотки; *9* — воздухоразделительная перегородка с диффузором; *10* — катушка обмотки возбуждения; *11* — центрирующее кольцо; *12* — центробежный вентилятор; *13* — траверса со щеточным устройством; *14* — крышка подшипника; *15* — вкладыш подшипника; *16* — электромашинный возбудитель; *17* — гибкая соединительная муфта; *18* — стояк подшипника; *19* — контактное кольцо; *20* — направляющий аппарат вентилятора; *21* — соединительные шины между контактными кольцами и обмоткой возбуждения; *22* — труба системы пожаротушения; *23* — выводы обмотки статора; *24* — направление движения нагретого воздуха к охладителям; *25* — направление движения охлажденного воздуха; *26* — термометр охлажденного воздуха; *27* — торцевой щит; *28* — смотровой люк

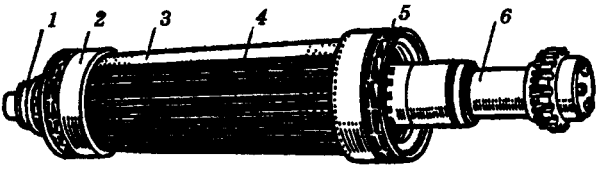


Рис. 27.12. Внешний вид неявнополюсного ротора

1 — контактные кольца; *2* — бандажное кольцо; *3* — массивный магнитопровод ротора; *4* — немагнитный клин паза ротора; *5* — центробежный вентилятор; *6* — хвостовик ротора

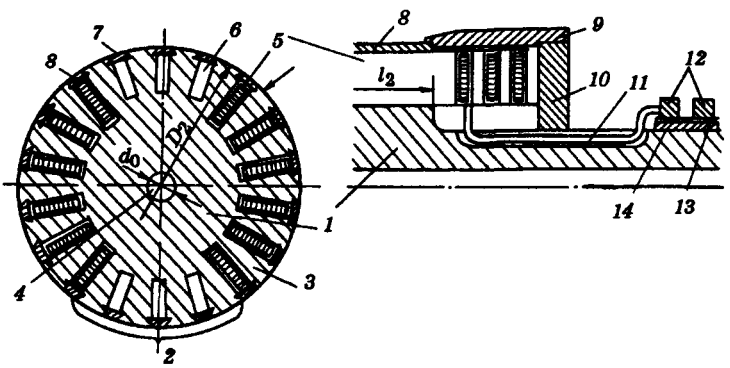


Рис. 27.13. Поперечный и продольный разрезы неявнополюсного ротора

1 — ярмо магнитопровода ротора; *2* — большой зубец магнитопровода; *3* — малый зубец магнитопровода; *4* — осевой канал магнитопровода; *5* — катушка обмотки возбуждения; *6* — аксиальный канал в большом зубце; *7* — магнитный клин канала; *8* — немагнитный клин; *9* — бандажное кольцо; *10* — центрирующее кольцо; *11* — соединение между обмоткой возбуждения и контактными кольцами; *12* — контактные кольца; *13* — изоляция втулки; *14* — втулка контактных колец; D_2 — внешний диаметр сердечника ротора; d_0 — диаметр внутреннего отверстия в сердечнике ротора; l_2 — длина сердечника ротора

(поз. *5* на рис. 27.11); в крупных турбогенераторах — только петлевые стержневые обмотки с двумя стержнями в пазу.

В турбогенераторе по рис. 27.11 применено косвенное охлаждение с циркуляцией воздуха в замкнутой системе. Необходимый для движения воздуха напор создается центробежными вентиляторами *12*. Направление движения воздуха указано стрелками. Воздухоохладители, вынесенные за пределы машины, на рисунке не показаны. По числу струй нагретого воздуха, выбрасываемого из машины, система охлаждения по рис 27.11 называется двухструйной.

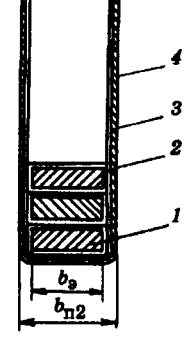


Рис. 27.14. Конструкция изоляции и крепления обмоток возбуждения синхронных неявнополюсных машин

$b_э$ — ширина проводника обмотки возбуждения; $b_{п2}$ — ширина паза сердечника ротора

Кроме воздушного охлаждения в турбогенераторах мощностью более 30 МВт получило применение косвенное водородное охлаждение. Преимущества этого способа охлаждения связаны с тем, что коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой поверхности к водороду получается в 1,35 раза больше, чем к воздуху, а теплопроводность примерно в 5 раз больше, чем у воздуха.

Поэтому при косвенном водородном охлаждении предельная мощность турбогенератора (при сохранении превышений температуры обмоток и размеров машины) может быть увеличена примерно в 1,2 раза, т.е до 200 МВт.

Существенное снижение превышения температуры обмоток при сохранении той же мощности или повышение мощности при сохранении превышения температуры обмоток дает применение непосредственного водородного охлаждения.

Использование непосредственного охлаждения при избыточном давлении водорода 0,3 МПа и сохранении допустимого превышения температуры и размеров машины позволяет увеличить предельную мощность турбогенератора до 350÷500 МВт.

Таблица 27.3. Эффективность непосредственного охлаждения различными веществами по сравнению с воздухом

Показатель (безразмерная величина)	Вещество				
	Воздух при давлении 0,1 МПа	Водород		Трансформаторное масло	Вода
		при давлении 0,103 МПа	при давлении 0,3 МПа		
Удельная весовая теплоемкость	1	14,35	14,35	1,65	3,75
Плотность	1	0,07	0,21	848	1000
Удельная объемная теплоемкость	1	1	3,02	1400	3750
Примерная способность к теплоудалению[1]	1	1	3,02	16,5	125
Коэффициент теплопередачи от поверхности канала к охлаждающей среде[2]	1	1,5	3,6	2	60

[1] Под примерной способностью к теплоудалению понимается количество теплоты, которое можно удалить от обмотки при допустимом превышении температуры и практически приемлемом давлении на входе в канал.

[2] Коэффициенты теплопередачи для всех веществ, кроме масла, даны для турбулентного движения в длинном узком канале (даны практически достижимые значения). Для масла дан коэффициент при ламинарном движении, поскольку турбулентное движение масла в узком канале получить затруднительно.

Еще большей, чем у водорода, способностью к теплоудалению (табл. 27.3) обладают жидкости (вода, трансформаторное масло). При одинаковых превышениях температуры и при практически приемлемых скоростях движения охлаждающих сред в каналах масло способно унести в 5,5 раза, а вода в 41,7 раза больше теплоты, чем водород при избыточном давлении 0,3 МПа. Жидкостное охлаждение обмотки статора позволяет повысить плотность тока в обмотке, если это оправдывается экономическими соображениями, или существенно (в 2÷3 раза) снизить превышение температуры обмотки статора, если плотность тока будет сохранена на прежнем уровне.

Однако применение жидкостного охлаждения только для обмотки статора не дает возможности повысить мощность машины, поскольку она ограничивается нагревом ротора. Дальнейшее повышение мощности до 1000 МВт и более оказывается возможным при охлаждении обмотки ротора дистиллированной водой.

27.4. СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Характеристики системы возбуждения определяются сочетанием свойств источника питания обмотки возбуждения и устройств автоматического регулирования. Системы возбуждения должны обеспечивать: 1) надежное питание обмотки ротора синхронной машины во всех режимах, в том числе и при авариях; 2) устойчивое регулирование тока возбуждения при изменении нагрузки в пределах номинальной; 3) достаточное быстродействие; 4) форсировку возбуждения.

Принципиальная схема возбуждения крупной синхронной машины показана на рис. 27.15.

Важным параметром системы возбуждения является номинальная скорость нарастания напряжения возбуждения, которая определяется по формуле

$$v_{ном} = 0{,}632\,\frac{U_п - U_{ном}}{U_{ном}\,t_1},$$

где $U_п$ — предельное напряжение возбуждения; $U_{ном}$ — номинальное напряжение возбуждения; t_1 — время нарастания напряжения возбуждения.

Время t_1 определяется по кривой нарастания напряжения возбудителя как время, в течение которого это напряжение возрастает от значения, равного номинальному напряжению возбуждения возбуждаемой машины, до $U' = U_{ном} + 0{,}632(U_п - U_{ном})$.

Кратностью предельного установившегося напряжения возбуждения синхронных машин (кратностью форсировки) называется отношение наиболь-

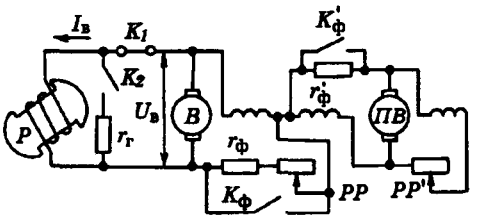


Рис. 27.15. Принципиальная схема системы возбуждения синхронной машины

B — возбудитель; $ПВ$ — подвозбудитель; P — ротор; PP — регулировочный реостат в обмотке возбуждения возбудителя; PP' — регулировочный реостат в обмотке возбуждения подвозбудителя; $K_ф$ и $K'_ф$ — контакторы, закорачивающие резисторы $r_ф$ и $r'_ф$ для осуществления форсировки возбуждения; K_2 — контактор, включающий обмотку возбуждения на гасительный резистор $r_г$; K_1 — контактор, размыкающий цепь возбуждения после включения контактора K_2; контакторы K_1 и K_2 объединяются в автомате гашения поля (АГП)

шего установившегося значения напряжения возбуждения к номинальному напряжению возбуждения синхронной машины.

Номинальным напряжением возбуждения электрической машины называется напряжение на выводах или контактных кольцах обмотки возбуждения при питании ее номинальным током возбуждения и сопротивлении обмотки, приведенном к расчетной рабочей температуре.

Системы возбуждения классифицируются в зависимости от источника питания обмотки возбуждения.

Систему возбуждения называют зависимой, если она питается от главной или дополнительной обмотки якоря возбуждаемого генератора, и независимой, если она питается от других источников (от шин собственных нужд электростанции, от возбудителя или вспомогательного генератора).

Среди независимых систем возбуждения различают:

а) прямые системы возбуждения, в которых ротор возбудителя или вспомогательного генератора находится на одном валу с ротором синхронного генератора (рис. 27.16, *а*, *б*) или сопрягается с ним редуктором скорости;

б) косвенные системы возбуждения, в которых ротор возбудителя или вспомогательного генератора приводится во вращение синхронным или асинхронным двигателем, специально устаиовленным для этой цели.

До 60-х годов преимущественное распространение имели прямые электромашинные системы возбуждения, в которых обмотка возбуждения синхронной машины питается от коллекторного генератора постоянного тока — возбудителя.

В соответствии с ГОСТ 533-76, ГОСТ 5616-81 и ГОСТ 609-75 турбо- и гидрогенераторы и синхронные компенсаторы могут иметь только обладающую наибольшей надежностью прямую систему возбуждения или систему самовозбуждения. Предельная мощность электромашиинных возбудителей при частоте вращения 3000 об/мин составляет примерно 300 кВт. Поэтому электромашинные системы возбуждения не могут применяться в турбогенераторах мощностью 200 МВт и выше, у которых мощность возбуждения превышает 1000 кВт.

По мере освоения производства и повышения надежности полупроводниковых выпрямителей все большее распространение получают вентильные системы возбуждения с кремниевыми диодами или тиристорами.

В настоящее время они применяются не только для синхронных двигателей и генераторов небольшой мощности, но и для крупных турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, в том числе и для установок предельных мощностей.

Различают три основные разновидности вентильных систем возбуждения:

1. Система самовозбуждения (рис. 27.16), в которой необходимая для возбуждения синхронной машины энергия отбирается от главной или дополнительной обмотки якоря (зависимая вентильная система). Выпрямление переменного тока осуществляется с помощью тиристоров. Отбор энергии осуществляется с помощью трансформаторов *9* и *7*, включенных соответственно параллельно и последовательно с обмоткой статора. Трансформатор *7* позволяет обеспечить форсирование возбуждения при близких коротких замыканиях, когда напряжение на обмотке якоря существенно снижается. Система самовозбуждения имеет по сравнению с другими системами более высокую надежность и меньшую стоимость из-за отсутствия в ней возбудителя или вспомогательного генератора.

2. Независимая вентильная система возбуждения (рис. 27.16, *б*), в которой энергия, необходимая для питания обмотки возбуждения, получается от вспомогательного синхронного генератора, ротор которого укреплен, как правило, на валу главного генератора. В схемах выпрямителей в этом случае используются полупроводниковые вентили (кремниевые диоды или тиристоры), собранные по трехфазной мостовой схеме. При регулировании возбуждения генератора используются одновременно возможности управления выпрямителями и возможности изменения напряжения вспомогательного генератора.

3. Бесщеточная система возбуждения, которая является одной из разновидностей прямых независимых вентильных систем возбуждения (на рисунке не показана). От системы, изображенной на

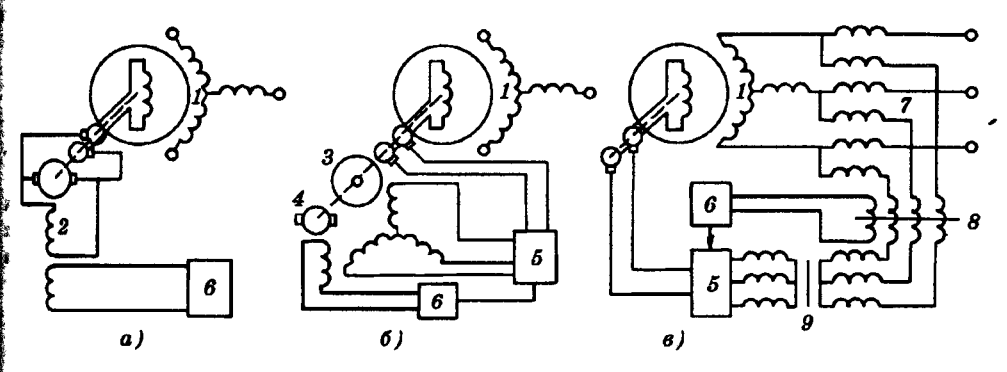


Рис. 27.16. Системы возбуждения синхронных машин

а — прямая электромашинная; *б* — прямая машина с использованием выпрямителей; *в* — система самовозбуждения; *1* — синхронный генератор; *2* — возбудитель постоянного тока; *3* — вспомогательный генератор; *4* — подвозбудитель вспомогательного генератора; *5* — управляемый выпрямитель; *6* — регулятор возбуждения; *7* — токовый трансформатор; *8* — управляемый от регулятора возбуждения реактор; *9* — трансформатор

рис. 27.16, *б*, она отличается тем, что имеет обращениый вспомогательный генератор *3*, у которого обмотка переменного тока размещается на роторе. Выпрямитель *5*, получающий питание от этой обмотки, расположен на валу главного генератора. Преимуществом данной системы является отсутствие скользящих контактов, которые в мощных турбогенераторах должны быть рассчитаны на тысячи ампер.

27.5. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Фаза обмотки якоря синхронной машины обладает активным сопротивлением и определенным индуктивным сопротивлением, связанным с полями взаимной индукции и рассеяния от токов в обмотке якоря.

В установившемся симметричном режиме в обмотке якоря имеется система токов I, образующих основную гармоническую МДС F_{am} и магнитное поле взаимной индукции, которые вращаются со скоростью ротора и занимают определенное положение по отношению к осям ротора d и q. Такая система токов в обмотке якоря называется системой токов прямой последовательности.

Образованное такой системой токов поле неподвижно по отношению к ротору. Оно не индуктирует в обмотках ротора (в обмотке возбуждения и в демпферной обмотке) каких-либо токов, которые могли бы вызывать дополнительные потери или демпфировать магнитное поле от токов в якоре. Поэтому при расчете сопротивлений фазы якоря для токов прямой последовательности приходится учитывать только магнитное поле и потери от токов в самой обмотке якоря.

Активное сопротивление проводников обмотки якоря. Это сопротивление определяется по электрическим потерям в обмотке $P_{э1}$, найденным с учетом вытеснения тока:

$$R = P_{э1} / (m_1 I^2),$$

где m_1 — число фаз обмотки якоря.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы якоря X_σ связано с полями рассеяния обмотки и индуктивностью рассеяния фазы якоря $L_{\sigma 1}$:

$$X_\sigma = 2\pi f L_{\sigma 1} = 4\pi \mu_0 f_1 w_1^2 \frac{l_\delta}{p q_1} \lambda_{\sigma 1},$$

где w_1 — число последовательных витков фазы обмотки якоря; p — число пар полюсов; q_1 — число пазов на полюс и фазу обмотки якоря; f_1 — частота; $\lambda_{\sigma 1}$ — магнитная проводимость для потокосцепления рассеяния; μ_0 — магнитная проницаемость немагнитиого зазора; l_δ — расчетная длина машины.

Главное индуктивное сопротивление якоря (в неявнополюсной машине). В ненасыщенной неявнополюсной машине, имеющей равномерный зазор δ, главное индуктивное сопротивление якоря X_a, называемое также сопротивлением взаимной индукции якоря, рассчитывается по главной индуктивности обмотки L_{11}:

$$X_a = 2\pi f L_{11} = \frac{4\mu_0 m_1 f_1 (w_1 k_{01})^2}{\pi p} \lambda_\delta,$$

где $\lambda_\delta = \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ — коэффициент проводимости равномерного зазора на один полюс; k_{01} — обмоточный коэффициент; k_δ — коэффициент зазора, учитывающий зубчатость сердечников статора и ротора; δ — ширина зазора.

Главные индуктивные сопротивления якоря по продольной и поперечной осям (в явнополюсной машине). В явнополюсной машине из-за неравномерности зазора главные индуктивности обмотки якоря по продольной и поперечной осям L_{ad} и L_{aq}, понимаемые как индуктивности соответственно для продольной и поперечной систем токов I_d и I_q, неодинаковы.

Главное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси

$$X_{ad} = 2\pi f L_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f_1 \left(w_1 k_{01}\right)^2 \lambda_{ad},$$

где $\lambda_{ad} = k_d \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ — коэффициент проводимости зазора по продольной оси; k_d — коэффициент формы поля по продольной оси.

Главное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси

$$X_{aq} = 2\pi f L_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f_1 \left(w_1 k_{01}\right)^2 \lambda_{aq},$$

где $\lambda_{aq} = k_q \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ — коэффициент проводимости зазора по поперечной оси; k_q — коэффициент формы поля по поперечной оси.

Из-за меньшей проводимости по поперечной оси главное индуктивное сопротивление по поперечной оси всегда меньше индуктивного сопротивления по продольной оси: $X_{aq} < X_{ad}$.

Индуктивное сопротивление якоря (в неявнополюсной машине). Представляет собой полное индуктивное сопротивление обмотки якоря для симметричной системы токов прямой последовательности:

$$X_1 = X_\sigma + X_a.$$

Индуктивные сопротивления якоря по продольной и поперечной осям (в явнополюсной машине). Эти сопротивления складываются из индуктивных сопротивлений рассеяния и главных индуктивных сопротивлений для соответствующих систем токов I_d или I_q.

Индуктивное сопротивление якоря по продольной оси

$$X_d = X_\sigma + X_{ad}.$$

Индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси

$$X_q = X_\sigma + X_{aq}.$$

Главное сопротивление якоря

$$\underline{Z}_a = R_a + j X_a = -\underline{E}_a / \underline{I}.$$

Активная R_a и индуктивная X_a составляющие главного сопротивления якоря $\underline{Z}_a$ зависят от главных индуктивных сопротивлений якоря по продольной и поперечной осям (X_{ad} и X_{aq}) и от направления МДС якоря F_{am} (или тока якоря I) по отношению к поперечной оси q ротора, которое характеризуется углом β (рис. 27.17):

$$X_a = \frac{X_{ad}+X_{aq}}{2} - \frac{X_{ad}-X_{aq}}{2}\cos 2\beta;$$

$$R_a = \frac{X_{ad}-X_{aq}}{2}\sin 2\beta.$$

Как видно из формул, сопротивление X_a содержит постоянную составляющую $(X_{ad}+X_{aq})/2$ и переменную составляющую с амплитудой $(X_{ad}-X_{aq})/2$, пропорциональную $\cos 2\beta$. При $\beta = 0$ или π, когда $I = I_q$, сопротивление $X_a = X_{aq}$. При $\beta = \pi/2$ или $3\pi/2$, когда $I = I_d$, сопротивление $X_a = X_{ad}$.

Сопротивление R_a отличается от нуля ($R_a \neq 0$) только в явнополюсной синхронной машине, имеющей $X_{ad} \neq X_{aq}$. Мощность $m_1 R_a I^2$, выделяющаяся в этом сопротивлении, представляет собой (при $R_a > 0$) электрическую мощность, преобразуемую в механическую мощность за счет явнополюсности (при $R_a < 0$ происходит обратное преобразование).

В неявнополюсной машине, имеющей $X_{ad} = X_{aq}$, активная составляющая сопротивления равна нулю ($R_a = 0$), а индуктивная составляющая одна и та же при любых углах β ($X_a = X_{ad} = X_{aq}$).

Полное сопротивление обмотки якоря

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j X_1,$$

где

$$R_1 = R + R_a = R + \frac{X_d - X_q}{2}\sin 2\beta$$

— активная составляющая полного сопротивления якоря;

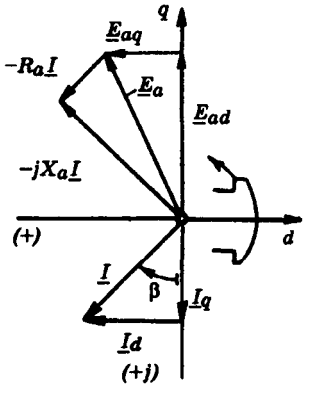


Рис. 27.17. К определению главного сопротивления якоря явнополюсной машины

$$X_1 = X_\sigma + X_a = \frac{X_d+X_q}{2} - \frac{X_d-X_q}{2}\cos 2\beta$$

— индуктивная составляющая полного сопротивления якоря.

В неявнополюсной машине полное сопротивление якоря и его составляющие не зависят от фазы тока (угла β):

$$R_1 = R; \quad R_a = 0; \quad X_1 = X_\sigma + X_a.$$

27.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

ФОРМА КРИВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

При холостом ходе ток в обмотке якоря равен нулю. Обмотка возбуждения с током I_f образует магнитное поле возбуждения. В результате вращения ротора вместе с полем в обмотке якоря индуктируется ЭДС E_f.

Поскольку искажение синусоидальности ЭДС E_f, равной напряжению, приводит к появлению добавочных потерь от высших гармонических во всех элементах электрической системы, ЭДС и напряжение синхронных генераторов должны быть как можно ближе к синусоидальным.

Несинусоидальность кривой напряжения (или тока) согласно стандарту на электрические машины (ГОСТ 183-74) оценивается коэффициентом искажения синусоидальности периодической кривой, который представляет собой выраженное в процентах отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд высших гармонических составляющих данной кривой к амплитуде ее основной гармонической.

Тем же стандартом предписывается иметь коэффициент искажения синусоидальности кривой линейного напряжения (при холостом ходе и номинальном напряжении) в трехфазных синхронных генераторах переменного тока частотой 50 Гц не более 5% для генераторов мощностью свыше 100 кВ·А и не более 10% для генераторов мощностью от 1 до 100 кВ·А. Основной причиной искажения синусоидальности кривой напряжения при холостом ходе является несинусоидальность пространственного распределения индукции поля возбуждения.

Уменьшение содержания высших гармонических в кривой ЭДС достигается путем укорочения шага обмотки якоря, размещения ее катушек в достаточно большом числе пазов, а также путем соединения фаз обмотки в звезду или треугольник.

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

Расчет магнитной цепи выполняется в режиме холостого хода для определения тока возбуждения

I_f или МДС возбуждения F_f, которые образуют магнитное поле взаимной индукции с потоком Ф, индуктирующим в обмотке статора заданную ЭДС E_f. Имея в виду, что магнитное поле распределено в зазоре несинусоидально, магнитный поток приходится рассчитывать по формуле

$$\Phi = k_\Phi \Phi_1 = E_f/(4k_B f_1 w_1 k_{01}),$$

где k_{01} — обмоточный коэффициент обмотки статора для первой гармонической составляющей индукции; $k_\Phi = \Phi/\Phi_1 \approx 1{,}04$ — коэффициент формы поля возбуждения; $k_B = \pi/(2\sqrt{2}\, k_\Phi) \approx 1{,}07$ — коэффициент формы ЭДС; $\Phi_1 = \sqrt{2}\, E_f / (2\pi f_1 w_1 k_{01})$ — магнитный поток взаимоиндукции, определенный по первой гармонической составляющей индукции.

Для определения характеристики намагничивания машины $\Phi = f(F_f)$ достаточно произвести расчет магнитной цепи при ЭДС $E_f = 0{,}5U_{ном}$; $U_{ном}$; $1{,}1U_{ном}$; $1{,}2U_{ном}$ и $1{,}3U_{ном}$, определяя поток Ф по вышеприведенной формуле.

Определение МДС возбуждения F_f, образующей поток Ф, производится на основе закона полного тока для линии поля, охватывающей ток $2w_f I_f$. Здесь w_f — число витков обмотки возбуждения, приходящихся на один полюс; I_f — ток возбуждения.

МДС возбуждения $F_f = w_f I_f$, рассчитанная на один полюс, равна сумме магнитных напряжений F_1 и F_2:

$$F_f = F_1 + F_2,$$

где F_1 — магнитное напряжение на участках линии поля, расположенных в зазоре между сердечниками статора и ротора, в зубце и в ярме сердечника статора; F_2 — магнитное напряжение на участках линии поля, расположенных в сердечнике ротора: полюсах явнополюсной синхронной машины (или в зубцах сердечника ротора неявнополюсной синхронной машины), а также в ярме сердечника ротора любой из этих машин.

Средние индукции и напряженности магнитного поля на участках линии поля, расположенных в зазоре, в зубцах и ярме сердечника статора, и, следовательно, магнитное напряжение F_1 могут быть выражены (с помощью характеристик намагничивания для стали сердечника) через поток Ф.

Средние индукции и напряженности магнитного поля на участках линии поля, расположенных в сердечнике ротора, и, следовательно, магнитное напряжение F_2 могут быть выражены (с помощью характеристик намагничивания для стали сердечника) через поток в сердечнике ротора

$$\Phi_2 = \Phi + \Phi_{f\sigma},$$

который складывается из потока Ф и потока рассеяния обмотки возбуждения:

$$\Phi_{f\sigma} = \mu_0 \Lambda_{f\sigma} l_\delta F_1,$$

где $\Lambda_{f\sigma}$ — магнитная проводимость потока рассеяния обмотки возбуждения.

Результаты расчетов F_f и $I_f = F_f/w_f$, проведенных при рекомендованных значениях E_f, представляются в виде характеристики холостого хода — зависимости ЭДС взаимоиндукции E_f от тока возбуждения I_f или от МДС возбуждения F_f.

Характеристику холостого хода $E_f = f(I_f)$ или $E_f = f(F_f)$ можно представить в относительной форме со значком *, приняв за базисное значение ЭДС — номинальное напряжение $U_{ном}$, за базисное значение МДС — МДС возбуждения $F_f = F_{fx}$, соответствующую номинальному напряжению при холостом ходе $E_f = U_{ном}$, за базисное значение тока — ток возбуждения $I_f = I_{fx} = F_{fx}/w_f$ при номинальном напряжении.

Сравнивая характеристики холостого хода различных явнополюсных машин, можно убедиться в том, что в относительных единицах они мало различаются. Усредненные относительные характеристики холостого хода явнополюсных синхронных машин, называемые нормальными характеристиками, приведены на рис. 27.18.

Характеристики различных неявнополюсных машин в относительных единицах также мало разли-

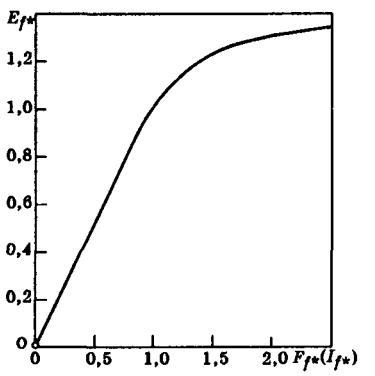


Рис. 27.18. Нормальные характеристики холостого хода явнополюсных снихронных машин

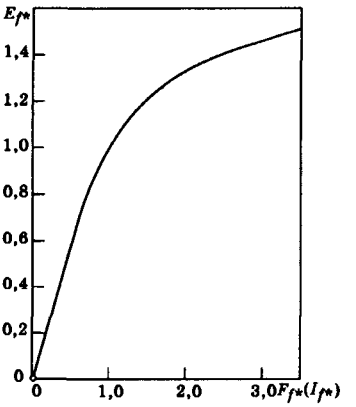


Рис. 27.19. Нормальные характеристики холостого хода неявнополюсных синхронных машин

чаются, и, когда отсутствуют характеристики конкретной машины, можно использовать усредненные относительные характеристики холостого хода неявнополюсных машин, называемые нормальными характеристиками. Нормальные характеристики холостого хода приведены на рис. 27.19.

27.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ ПРИ НАГРУЗКЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЕ ПРИ НАГРУЗКЕ

В насыщенной неявнополюсной машине характеристики намагничивания для поля взаимной индукции получаются нелинейными. Это исключает возможность рассмотрения поля взаимной индукции, образованного МДС возбуждения F_f, независимо от поля взаимной индукции, образованного МДС якоря F_a, с последующим наложением этих полей.

При насыщенной магнитной цепи приходится определять результирующее поле взаимной индукции с потоком $\Phi_r = \Phi$, образованное МДС F_f и F_a совместно. Предварительно необходимо заменить МДС якоря F_a эквивалентной МДС возбуждения F_{af}. Если известно главное индуктивное сопротивление обмотки якоря $X_a = X_1 - X_\sigma = X_{ad}$, рассчитанное без учета насыщения, то F_{af} можно определить по ЭДС $E_a = X_{ad} I$ с помощью спрямленной характеристики холостого хода (рис. 27.20).

Имея в виду, что МДС F_f направлена по продольной оси полюсов, а F_{af} совпадает по фазе с током I (см. рис. 27.20), можно составить уравнение МДС в комплексной форме:

$$\underline{F}_r = \underline{F}_f + \underline{F}_{af}$$

и определить из него результирующую МДС F_r.

Результирующую ЭДС взаимной индукции E_r можно определить с помощью характеристики холостого хода $E_f = f(F_f)$, считая $F_f = F_r$ и $E_r = E_f$ (см. рис. 27.19 и 27.20).

Для завершения описания электромагнитных процессов в неявнополюсной машине к уравнению МДС и характеристике холостого хода $E_f = f(F_f)$ нужно добавить уравнение напряжений обмотки якоря

$$\underline{E}_r = \underline{U} + R\,\underline{I} + j\,X_\sigma\,\underline{I}.$$

Составленные выше уравнения могут быть использованы для определения тока возбуждения I_f в нагрузочном режиме, заданном напряжением якоря U, током якоря I и углом между ними φ. На рис. 27.20 показано графическое определение тока возбуждения I_f с помощью диаграммы, соответствующей этим уравнениям, и характеристики холостого хода по рис. 27.19. Построения могут быть выполнены в относительных или абсолютных единицах. В последнем случае для пересчета характеристики холостого хода нужно знать ток возбуждения I_{fx} или МДС F_{fx} при холостом ходе и номинальном напряжении.

Порядок построения диаграммы для определения тока возбуждения (см. рис. 27.20):

1) в произвольном масштабе откладывается вектор тока (в относительных единицах);

2) под углом φ к вектору тока $\underline{I}$ строится вектор напряжения $\underline{U}$ в относительных единицах. Масштабы для напряжений и МДС удобно выбрать такими же, как на нормальной характеристике холостого хода (см. рис. 27.19);

3) далее откладывается вектор $j\,X_\sigma\,\underline{I}$, длина которого в выбранном масштабе соответствует напряжению $X_\sigma I$ в относительных единицах. Определяется результирующая ЭДС в относительных единицах E_r (вектор RI можно приближенно считать равным нулю);

4) по продолжению прямолинейного участка характеристики холостого хода определяется МДС возбуждения F_{af}, эквивалентная МДС якоря F_a при токе I.

МДС F_{af} в относительных единицах соответствует напряжению $X_{ad} I$ в относительных единицах;

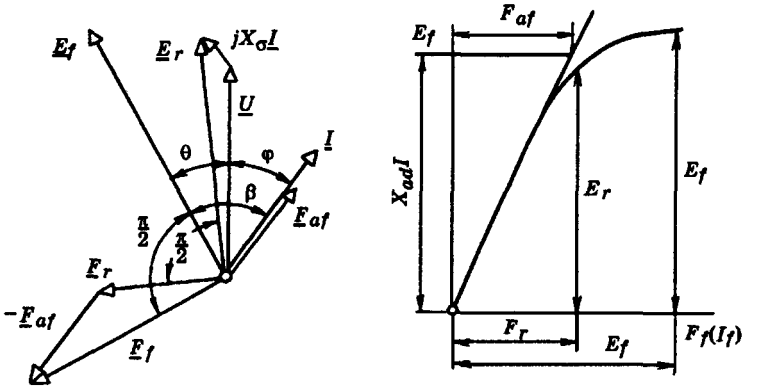


Рис. 27.20. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины в режиме генератора с учетом насыщения

5) результирующая МДС F_r (в относительных единицах) соответствует характеристике холостого хода ЭДС E_r (в относительных единицах);

6) МДС обмотки возбуждения (в относительных единицах)

$$\underline{F}_f = \underline{F}_r - \underline{F}_{af},$$

причем вектор $\underline{F}_r$ опережает вектор $\underline{E}_r$ на $\pi/2$, а вектор $\underline{F}_{af}$ совпадает по направлению с током I;

7) ток возбуждения в абсолютных единицах $I_f = I_{fx} F_f$, где I_{fx} — ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению $U_{ном}$ при холостом ходе (в абсолютных единицах); F_f — МДС возбуждения (в относительных единицах).

Примечания: 1. С помощью диаграммы определяется также угол нагрузки θ, между вектором напряжения $\underline{U}$ и ЭДС возбуждения $\underline{E}_f$. 2. При построении диаграммы без учета насыщения следует пользоваться характеристикой холостого хода, полученной путем продолжения прямолинейного участка нормальной характеристики.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЕ ПРИ НАГРУЗКЕ

В насыщенной явнополюсной машине поля от различных МДС (F_f, F_d и F_q) нельзя считать независимыми. Для расчета результирующего магнитного поля, образующегося в насыщенной явнополюсной машине под действием МДС возбуждения F_f, а также продольной и поперечной МДС якоря F_d и F_q, можно воспользоваться приближенным методом, основанным на работах Р. Рихтера. В этом методе действительные синусоидально распределенные МДС F_d и F_q, оказывающие определенное влияние на основную гармоническую составляющую индукции поля от МДС возбуждения F_f и индуктируемую ею ЭДС, заменяются эквивалентными в отношении этого влияния МДС обмотки возбуждения F_{ad}, F_{aq}, F_{qd}, найденными с учетом насыщения.

Продольная МДС возбуждения F_{ad} эквивалентна МДС якоря F_d в отношении ее участия в образовании основной гармонической составляющей индукции продольного поля при нагрузке и соответствующей ей ЭДС F_{rd}.

Поперечная МДС возбуждения F_{aq} эквивалентна МДС якоря F_q в отношении ее участия в образовании основной гармонической составляющей индукции поперечного поля и соответствующей ей ЭДС $E_{rq} = E_{aq}$.

Продольная МДС возбуждения F_{qd} эквивалеитна МДС якоря F_q в отношении ее влияния на основную гармоническую составляющую индукции продольного поля и соответствующую ей ЭДС E_{rd}.

Эквивалентные МДС F_{ad}, F_{aq}, F_{qd} зависят не только от МДС F_d, F_q и формы зазора, характеризующейся коэффициентами реакции якоря по продольной и поперечной осям k_{ad} и k_{aq}, но и от степенн насыщения магнитной цепи результирующим полем взаимоиндукции, соответствующим ЭДС E_r:

$$F_{ad} = \xi_d k_{ad} F_d;$$

$$F_{aq} = \xi_q k_{aq} F_q;$$

$$F_{qd} = \xi_{qd} F_{aq},$$

где коэффициенты ξ_d, ξ_q, ξ_{qd} зависят от ЭДС $E_{r*} = E_r / U_{ном}$, выраженной в относительных единицах, и для явнополюсной синхронной машины, обладающей типичными для такой машины соотношениями размеров ($\delta_m/\delta = 1{,}5$; $\delta/\tau = 0{,}03 \div 0{,}05$; $\alpha = b_p/\tau = 0{,}69 \div 0{,}71$, где δ_m — зазор под краем полюса; δ — зазор на оси полюса; τ — полюсное деление; b_p — ширина полюсного наконечника; α — коэффициент полюсного перекрытия) и нормальными характеристиками холостого хода, могут быть найдены по рис. 27.21.

С помощью коэффициентов ξ_d и ξ_q могут быть найдены насыщенные значения главных индуктивных сопротивлений якоря по продольной и поперечной осям:

$$X_{adн} = \xi_d X_{ad};$$

$$X_{aqн} = \xi_q X_{aq},$$

где X_{ad}, X_{aq} — соответствующие индуктивные сопротивления без учета насыщения.

Через индуктивные сопротивления $X_{adн}$ и $X_{aqн}$ выражаются ЭДС взаимной индукцни $\underline{E}_{ad} = -j X_{adн} \underline{I}_d$ и $\underline{E}_{aq} = -j X_{aqн} \underline{I}_q$, индуктируемые продольным I_d и поперечным I_q токами в насыщенной машине. По ЭДС E_{ad} и E_{aq} и спрямленной характеристике холостого хода $E_f = f(I_f)$ могут быть определены эквивалентные МДС F_{ad} и F_{aq} с учетом насыщения (рис. 27.22). В этом случае отпадает необходимость в расчете МДС F_d, F_q и коэффициентов k_{ad} и k_{aq}.

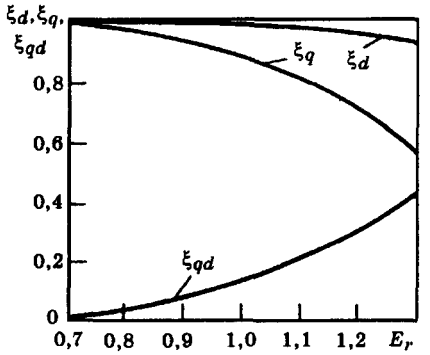


Рис. 27.21. Зависимость коэффициентов ξ_d, ξ_q, ξ_{qd} от ЭДС E_r

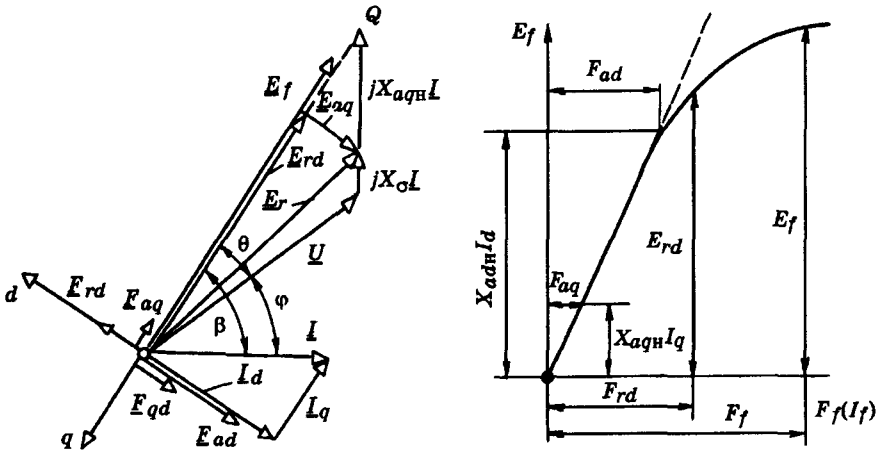


Рис. 27.22. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины в режиме генератора с учетом насыщения

Преиебрегая влиянием насыщения на индуктивное сопротивление рассеяния X_σ, можно записать уравнение напряжений якоря в следующем виде:

$$\underline{E}_r = \underline{U} + R\,\underline{I} + j\,X_\sigma\,\underline{I},$$

где $\underline{E}_r = \underline{E}_{rd} + \underline{E}_{aq}$ — ЭДС, индуктированная результирующим полем взаимной индукции; $\underline{E}_{rd}$ — ЭДС, индуктированная результирующим продольным полем взаимной индукции с потоком Φ_{rd}; ЭДС E_{rd} соответствует МДС возбуждения F_{rd}, найденной по характеристике холостого хода $E_f = f(F_f)$; $\underline{E}_{aq} = -j\,X_{aq\text{н}}\,I_q$ — ЭДС, индуктированная результирующим поперечным полем от МДС F_{aq}.

Результирующая МДС по продольной оси F_{rd}, соответствующая ЭДС E_{rd} и опережающая последнюю на угол $\pi/2$, представляет собой сумму всех МДС, которые действуют по продольной оси:

$$\underline{F}_{rd} = \underline{F}_f + \underline{F}_{ad} + \underline{F}_{qd}.$$

В это уравнение, являющееся уравнением МДС по продольной оси, входят МДС возбуждения $\underline{F}_f$, МДС $\underline{F}_{ad}$, совпадающая по направлению с током I_d, и МДС $\underline{F}_{qd}$, которая всегда отстает от ЭДС E_{rd} на угол $\pi/2$ и направлена против $\underline{F}_f$.

Из уравнеиия МДС по продольной оси можно найти МДС

$$\underline{F}_f = \underline{F}_{rd} - \underline{F}_{ad} - \underline{F}_{qd}.$$

Определение тока возбуждения I_f или МДС возбуждения F_f в нагрузочном режиме, заданном напряжением якоря $\underline{U}$, током якоря $\underline{I}$ и углом между ними φ, производится графически с помощью векторной диаграммы, соответствующей составленным выше уравнениям для напряжений и МДС, и нормальной характеристики холостого хода для явнополюсных синхронных машин (см. рис. 27.18 и 27.22).

Порядок построения векторной диаграммы для определения тока возбуждения I_f (см. рис. 27.22):

1) векторы тока $\underline{I}$, напряжения $\underline{U}$ и $j\,X_\sigma\,\underline{I}$ изображаются в соответствии с указаниями к построению диаграммы неявнополюсного генератора (п.1÷3). После этого может быть найден вектор результирующей ЭДС $\underline{E}_r$;

2) для определения направления вектора $\underline{E}_f$ строится комплекс $\underline{E}_r + j\,X_{aq\text{н}}\,\underline{I}$, конец которого определяет точку Q и направление оси $(-q)$.

Ось d отстает от оси q на угол $\pi/2$.

3) раскладывая ток $\underline{I}$ на направления осей d и q, находят продольную и поперечную составляющие тока I_d и I_q;

4) по продолжению прямолинейного участка характеристики холостого хода определяется магнитодвижущая сила обмотки возбуждения F_{ad}, эквивалентная продольной МДС обмотки якоря. МДС F_{ad} в относительных единицах соответствует напряжению $X_{ad\text{н}}\,I_d$ в относительных единицах, где $X_{ad\text{н}} = X_{ad}\,\xi_d$; ξ_d по рис. 27.21. На диаграмме МДС F_{ad} совпадает по направлению с током I_d;

5) результирующая МДС F_{rd} соответствует по характеристике холостого хода ЭДС

$$\underline{E}_{rd} = \underline{U} + j\,X_\sigma\,\underline{I} + j\,X_{aq\text{н}}\,I_q,$$

где $X_{aq\text{н}} = X_{aq}\,\xi_q$; ξ_q — по рис. 27.21.

На диаграмме комплекс МДС $\underline{F}_{rd}$ опережает ЭДС $\underline{E}_{rd}$ на $\pi/2$;

6) по продолжению прямолинейного участка характеристики холостого хода определяется МДС F_{aq}, эквивалентная поперечной МДС якоря.

МДС F_{aq} в относительных единицах соответствует напряжению $X_{aq\text{н}}\,I_q$ в относительных единицах;

7) рассчитывается МДС $F_{qd} = \xi_{qd}\,F_{aq}$, эквивалентиая размагничивающему влиянию поперечной МДС на продольное поле (ξ_{qd} — по рис. 27.21). На диаграмме эта МДС откладывается в виде комплекса, отстающего на $\pi/2$ от ЭДС $\underline{F}_{rd}$;

8) МДС обмотки возбуждения в относительных единицах

$$\underline{F}_f = \underline{F}_{rd} - \underline{F}_{ad} - \underline{F}_{qd};$$

9) ток возбуждения в абсолютных единицах (амперах)

$$I_f = I_{fx} F_f,$$

где I_{fx} — ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению $U_{ном}$ при холостом ходе (в абсолютных единицах); F_f — МДС возбуждения (в относительных единицах).

Примечание. При построении диаграммы без учета насыщения следует пользоваться характеристикой холостого хода, полученной путем продолжения прямолинейного участка нормальной характеристики.

Коэффициенты насыщения принимают в этом случае следующие значения:

$$\xi_d = \xi_q = 1; \quad \xi_{qd} = 0.$$

ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ СИНХРОННЫХ МАШИН В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

Построение векторной диаграммы машины в режиме двигателя принципиально ничем не отличается от построения диаграммы генератора, поскольку уравнение напряжений синхронной машины в общем виде одинаково пригодно для обоих режимов.

Диаграммы отличаются только фазой тока по отношению к напряжению машины. Если в режиме двигателя сохранить те же положительные направления для всех величин, что и в режиме генератора, то активная составляющая тока $\underline{I}_a$ двигателя будет находиться в противофазе с напряжением машины $\underline{U}$. Что касается реактивной составляющей тока $\underline{I}_r$, то она по-прежнему при перевозбуждении будет отставать от $\underline{U}$, а при недовозбуждении опережать $\underline{U}$ на $\pi/2$.

Кроме вектора напряжения машины $\underline{U}$ на диаграмме показывают вектор напряжения сети $\underline{U}_c = -\underline{U}$. Активный ток в режиме двигателя совпадает по фазе с напряжением $\underline{U}_c$, поскольку двигатель потребляет мощность из сети; ток двигателя при перевозбуждении опережает напряжение U_c, так как в этом случае двигатель отдает реактивную мощность в сеть.

На рис. 27.23 и 27.24 показаны векторные диаграммы перевозбужденных явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин в режиме двигателя.

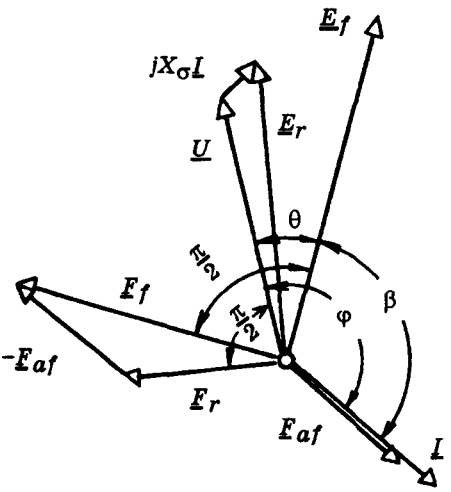


Рис. 27.23. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины в режиме двигателя с учетом насыщения (при перевозбуждении)

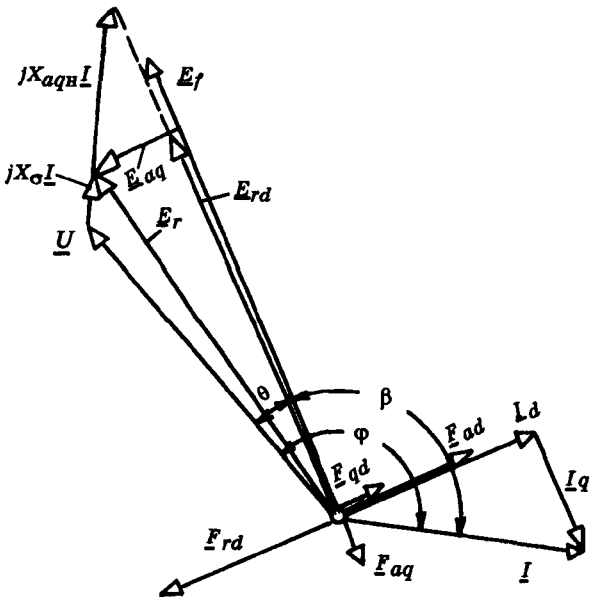


Рис. 27.24. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины в режиме двигателя с учетом насыщения (при перевозбуждении)

27.8. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на выводах обмотки статора (якоря) от тока статора $[U = f(I)]$ при n = const, I_f = = const, $\cos\varphi$ = const (рис. 27.25). По внешней характеристике при номинальном токе возбуждения $I_{f\text{ном}}$ определяется изменение напряжения ΔU % при сбросе нагрузки от номинальиой до нулевой:

$$\Delta U\,\% = \frac{U' - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 = 25{+}35\%,$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение при иоминальном токе якоря $I_{\text{ном}}$, номинальном коэффициенте мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$ и номинальном токе возбуждения $I_{f\text{ном}}$; U' — напряжение при токе якоря $I = 0$ и номинальном токе $I_{f\text{ном}}$.

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока статора (якоря) $[I_f = f(I)]$ при n = const, U = const, $\cos\varphi$ = = const (рис. 27.26).

Для расчета регулировочной характеристики необходимо при заданном напряжении U и угле φ определить с помощью векторной диаграммы (см. §27.7) токи возбуждения, соответствующие нескольким токам якоря в диапазоне от 0 до $I_{\text{ном}}$.

Для определения внешней характеристики при сбросе нагрузки, когда напряжение изменяется от $U_{\text{ном}}$ до U', необходимо предварительно построить регулировочные характеристики для нескольких значений напряжения в диапазоне от $U_{\text{ном}}$ до U' при заданном угле φ. С помощью этих характеристик, задавшись определенным значением тока возбуждения, можно найти несколько точек кривой зависимости напряжения от тока якоря и построить требуемую внешиюю характеристику.

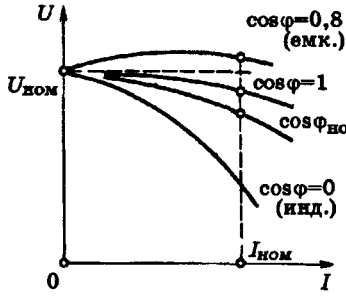


Рис. 27.25. Внешние характеристики при $I_f = I_{fx}$

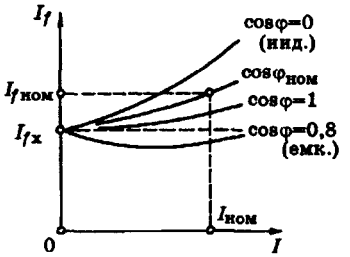


Рис. 27.26. Регулировочные характеристики при $U = U_{\text{ном}}$

27.9. СИММЕТРИЧНОЕ (ТРЕХФАЗНОЕ) КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ВЫВОДАХ МАШИНЫ

Режим работы синхронной машины, при котором все фазы обмотки якоря замкнуты накоротко ($U = 0$), а частота вращения равна номинальной ($n = n_{\text{ном}}$), называется симметричным коротким замыканием. Из-за сильного размагничивающего действия поля якоря результирующее поле весьма мало и машина ненасыщена. При пренебрежении активным сопротивлением якоря ($r_a << X_d$) процесс описывается уравнением

$$\underline{E}_f = j X_d \underline{I}_d = j X_d \underline{I}_{\text{к}},$$

где E_f — ЭДС возбуждения, определяется по спрямленной характеристике холостого хода $E_f = f(I_f)$; $I_{\text{к}}$ — ток короткого замыкания (рис. 27.27).

Ток симметричного короткого замыкания при токе возбуждения I_f

$$I_{\text{к}} = E_f / X_d .$$

Характеристика короткого замыкания — зависимость установившегося тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$ от тока I_f при n = const (см. рис. 27.27). Треугольник ABC называется реактивным треугольником ($AB = x_\sigma I_{\text{к}}$; $BC = F_{ad} = k_{ad} F_d$).

Отношение короткого замыкания (ОКЗ по ГОСТ183-74) — отношение тока установившегося короткого замыкания к номинальному току якоря

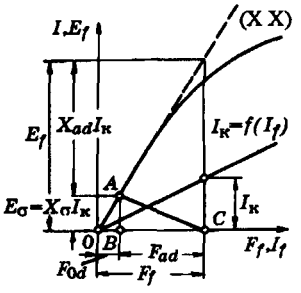


Рис. 27.27

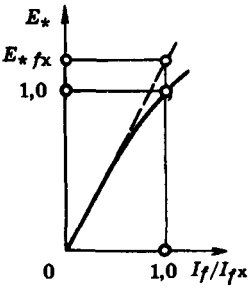


Рис. 27.28

(ток короткого замыкания в относительных единицах) при токе возбуждения, соответствующем номинальному напряжению по характеристике холостого хода (рис. 27.28):

$$\text{ОКЗ} = I_{к*} = \frac{E_{f\,x*}}{X_{d*}} = \frac{1{,}1 \div 1{,}2}{X_{d*}}.$$

27.10. РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО С МОЩНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ

Активная мощность явнополюсной синхронной машины (при допущении $r_a << X_d$)

$$P \approx P_{эм} = mU\left[\frac{E_f}{X_d}\sin\theta + \frac{U}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta\right],$$

где θ — электрический угол между ЭДС $\underline{E}_f$ и напряжением машины $\underline{U}$; $\theta > 0$, если $\underline{U}$ отстает от $\underline{E}_f$, $P > 0$, если мощность отдается в сеть; m — число фаз обмотки якоря.

Реактивная мощность явнополюсной синхронной машины

$$Q = mU\left[\frac{E_f\cos\theta}{X_d} - \frac{U}{X_d} - U\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin^2\theta\right],$$

где $Q > 0$ при отстающей от $\underline{U}$ реактивной составляющей тока (при размагничивающей реакции якоря).

Приведенные выше формулы выводятся из анализа векториой диаграммы ненасыщенной явнополюсной машины.

Зависимости P, $Q = f(\theta)$ при $U = \text{const}$ и $E_f = \text{const}$ ($I_f = \text{const}$) называются угловыми характеристиками синхронной машины (рис. 27.29).

Максимальная активная мощность (предел статической устойчивости)

$$P_{max} \approx \frac{m\,U\,E_f}{X_d}.$$

Статическая перегружаемость синхронного генератора — отношение максимальной активной мощности, которую генератор может развить при номинальном возбуждении и напряжении, к номинальной активной мощности:

$$\frac{P_{max}}{P_{ном}} \approx \frac{E_{f*\,ном}}{X_{d*}\cos\varphi_{ном}} \approx \frac{M_{max}}{M_{ном}}.$$

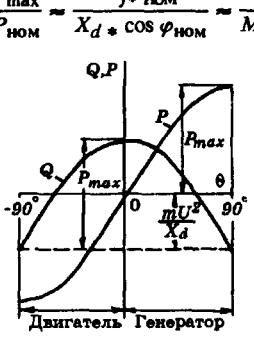


Рис. 27.29. Угловые характеристики неявнополюсной машины

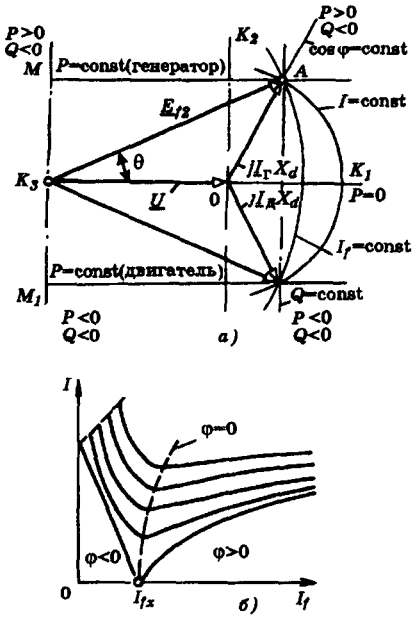


Рис. 27.30. Векторная диаграмма синхронной машины, работающей в электрической системе (*а*), и U-образные характеристики синхронной машины (*б*)

Требования к статической перегружаемости устанавливаются стандартами на синхронные машины.

Режимы работы и характеристики синхронной машины, работающей параллельно с мощной электрической сетью при $\underline{U}_c = \text{const}$, могут быть проанализированы с помощью векторной диаграммы, изображенной на рис. 27.30, *а* (для упрощения пояснений рассматривается ненасыщенная неявнополюсная машина). Конкретный режим работы характеризуется положением конца вектора $\underline{E}_f$ на диаграмме (точка A):

A выше линии K_3K_1 — генераторный режим;

A ниже линии K_3K_1 — двигательный режим;

A — на линии K_3K_1 — режим синхронного компенсатора.

При перемещении точки A по линиям $P = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$, $I = \text{const}$, $I_f = \text{const}$, $Q = \text{const}$ могут быть построены соответствующие эксплуатационные характеристики синхронной машины. Линия MM_1 ограничивает область устойчивых режимов работы синхронной машины ($-90° < \theta < 90°$).

Зависимость $I = f(I_f)$ при $U = \text{const}$, $P = \text{const}$ называется U-образной характеристикой синхронной машины (рис. 27.30, *б*).

27.11. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ МАШИНАХ БОЛЬШОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

В сводных табл. 27.4—27.8 приводятся обобщенные данные основных типов турбогенераторов, гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, а также

Таблица 27.4. Турбогенераторы

Тип	$P_{ном}$, МВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
Т	2,5; 4; 6; 12; 20	3000	3,15; 6,3; 10,5	Исполнение закрытое. Охлаждение воздушное по замкнутому циклу
ТВС	32	3000	6,3; 10,5	Исполнение закрытое. Косвенное водородное охлаждение
ТВФ	55; 63; 100; 110	3000	6,3; 10,5	Косвенное охлаждение обмотки и сердечника статора водородом, непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом
ТВВ	160; 200; 300; 500; 800; 1200	3000	15,75÷24	Непосредственное охлаждение обмотки статора водой, непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом при избыточном давлении, заполнение корпуса статора водородом
ТВВ	1000	1500	24	
ТГВ	200; 300	3000	15,75; 20	Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водородом
ТГВ200М	200	3000	15,75	Непосредственное охлаждение обмотки статора водой, непосредственное охлаждение обмотки ротора и активной стали водородом
ТГВ	500	1500, 3000	20	Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водой и сердечников статора и ротора водородом
ТЗВ	800	3000	24	Полное водяное охлаждение
ТВМ	300; 500	3000	20; 36,75	Непосредственное охлаждение обмотки и сердечника статора изоляционным маслом, непосредственное охлаждение ротора водой

Таблица 27.5. Гидрогенераторы

Тип	$S_{ном}$, МВ·А	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
СТ	0,63÷3,125	600; 750	6,3	Горизонтальные для высоконапорных гидроэлектростанций; защищенные с вентиляцией по разомкнутому циклу; прямая электромашинная система возбуждения
СГК	5,67÷23,3	78,9÷150	1,45÷4,0	Горизонтальные капсульные, с косвенным воздушным охлаждением
СГКВ	20; 28; 45,9	93,8; 6,2; 75	3,15; 4,16; 6,3	Горизонтальные капсульные, с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора водой
СВ	28,75÷306	57,7÷428,6	10,5; 15,75	Вертикальные, индивидуального исполнения, с косвенным воздушным охлаждением
СВО	45,6; 209; 236	150; 166,7	10; 15; 15,75	Вертикальные обратимые двигатель-генераторы (для ГАЭС), с воздушным охлаждением
СВФ	590; 711	93,8; 142,8	15,75	Вертикальные, с непосредственным охлаждением обмотки статора водой и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом
ВГС	3,0÷282	50÷600	6,3÷15,75	Вертикальные, индивидуального исполнения, с косвенным воздушным охлаждением
ВГСФ	294	200	15,75	Вертикальные, индивидуального исполнения, с косвенным охлаждением обмотки статора воздухом и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом
ВГСВФ	353	200	15,75	Вертикальные, с непосредственным охлаждением обмотки статора водой и форсированным охлаждением обмотки ротора воздухом

Таблица 27.6. Синхронные компенсаторы

Тип	$S_{ном}$, МВ·А	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
КС	16	1000	6,3; 10,5	Закрытые, с косвенным воздушным охлаждением по замкнутому циклу
КСВ	50; 100; 160	750	11; 15,75	Косвенное охлаждение обмотки статора и форсированное охлаждение обмотки ротора водородом при избыточном давлении 0,1÷0,2 МПа
КСВБ, КСВБО	50; 100; 160	750	11; 15,75	То же, что КСВ, только с бесщеточной системой возбуждения; КСВБО — с реверсивным возбуждением

Таблица 27.7. Синхронные генераторы

Тип	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, В	Краткая характеристика
ЕСС	5÷50	1500	230; 400	Защищенные, возбуждение через полупроводниковые выпрямители Общего назначения
ЕСС5	8÷75	1000; 1500	230; 400	Горизонтальные, защищенные, с аксиальной вытяжной вентиляцией Общего назначения
СГ2	125÷315	500; 600; 1000	400	Защищенные, с радиальной самовентиляцией. Возбуждение от тиристорного преобразователя, питающегося от дополнительной обмотки
СГД (10-й габарит)	75÷200	750; 1000; 1500	230; 400	Горизонтальные, защищенные, с аксиальной вытяжной вентиляцией Возбуждение прямое с использованием клиноременной передачи Предназначаются для сопряжения с дизелем
СГД2	400÷800	375	400; 6300	Горизонтальные, с приводом от дизелей, с самовентиляцией, со статической системой возбуждения
СГДС	1000÷1250	750	10 500; 6300	Закрытые, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу, электромашинная система возбуждения
ОС	5÷125	1500	230; 400	Для общепромышленного применения
ГМС	200÷500	500	230; 400	Горизонтальные, брызгозащищенные, с самовентиляцией. Для работы в комплекте с дизелем на морских судах (500 Гц)
ГИМ-1 ГИС-2	0,8; 1 2,3	3000 3000	220 80	Трехфазные синхронные генераторы индукторного типа разноименнополюсного исполнения. Генераторы ГИС-2 горизонтальные закрытые Генераторы ГИМ-1 вертикальные, в обдуваемом исполнении, в комплекте с двигателем образуют одномашинный агрегат. Предназначаются для питания высокочастотных двигателей (300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2400 Гц)
ГСПМ	37,5	3000	230; 400	Горизонтальные, защищенные, с постоянными магнитами, 400 Гц, для питания цепей регулирования турбогенераторов
ГПЧ	12; 75	1500	230	Горизонтальные, закрытые, 400 Гц

Таблица 27.8. Синхронные двигатели

Тип	$P_{ном}$, МВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
СД2	0,132÷1,0	500; 600; 750; 1000; 1500	0,38; 6	Горизонтальные, защищенные, с самовентиляцией; тиристорное возбуждение с питанием от дополнительной обмотки; общего назначения
СДН2, СДН32	0,315÷4,0	300; 375; 500; 600; 750; 1000	6	Горизонтальные, на стояковых подшипниках, открытые (СДН2) и закрытые (СДН32), с тиристорной системой возбуждения; общего назначения
СДЗ	0,16÷1,0	500; 600; 750; 1000; 1500	0,38; 6	Горизонтальные, закрытые, с принудительной вентиляцией, с прямой электромашинной системой возбуждения; общего назначения
БСДК, БСДКП	0,2	500	0,38	Открытые, с самовентиляцией (БСДК) и взрывозащищенные с принудительной вентиляцией (БСДКП); бесщеточная система возбуждения; для привода компрессоров
ВДС ВДС2	4,0÷12,5	187,5; 214; 250; 300; 333; 375	6; 10	Вертикальные, подвесные, с водяными воздухоохладителями; вентильное или электромашинное возбуждение; для привода вертикальных гидравлических насосов
ВСДН (СДВ)	0,63÷3,2	375; 500; 600; 750	6	Подвесные, защищенные, с самовентиляцией по разомкнутому циклу; статическая вентильная система возбуждения; для привода вертикальных гидраалических насосов
ДСЗ (21-го габарита)	12,5÷22	375	6; 10	Закрытые, с самовентиляцией по замкнутому циклу; вентильная система возбуждения; для привода агрегатов прокатного стана

Окончание табл. 27.8

Тип	$P_{ном}$, МВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, кВ	Краткая характеристика
СДК2	0,315÷0,68	375; 500; 600	3; 6	Защищеиные, возбуждение от тиристорных возбудителей; для привода поршневых компрессоров
СДКП2	0,315÷5,0	300; 375; 500; 600	3; 6; 10	Взрывозащищеинные, продуваемые; остальное то же, что СДК2
СДМЗ	0,63÷3,2	100; 150	6	Звкрытые, с принудительиой веитиляцией по замкнутому циклу; тиристорная система возбуждеиия; для приводв мельниц
СДСЗ МС213, МС325	0,63÷19,5 3,2÷10,9	300; 375; 500; 750	6; 10 10,5	Горизонтальные, на стояковых подшипииках, закрытые с прииудительиой веитиляцией; для комплектации прокатиого оборудования
СДСП	0,88÷2,0	250; 300; 375	6	Взрывозащищеинные; для приводв поршневых компрессоров
СДЭ-2	0,52,5	1000	6; 10	Защищенные, с самовеитиляцией; тиристорное возбуждеиие; для привода экскаваторных агрегатов
СТД	0,63÷12,5	3000	6; 10	Закрытые, для работы в иевзрывоопасной среде; бесщеточная системв возбуждеиия; для привода быстроходиых механизмов
СТДП	1,25÷12,5	3000	6; 10	Взрывозащищенные, продуваемые; остальное то же, что СТД
СДЗ-2	0,25÷1,0	600; 750; 1000; 1500	6	Закрытые, с самовентиляцией; тиристорнвя системв возбуждения; для привода дисковых мельииц

синхронных генераторов и двигателей общего и специального назначения, изготавливаемых серийно.

В последующих параграфах сообщаются более подробные сведения о некоторых типах синхронных машин. Приводимые ниже технические данные машин составлены на основании каталожно-справочных материалов.

27.12. ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

Турбогенераторы выпускаются в виде нескольких серий, в пределах каждой из которых использованы единые конструктивные решения. Обозначение типа турбогенераторов расшифровывается следующим образом: буквеиная часть указывает на принадлежность к серии (принятую систему охлаждения) (см. табл. 27.4); следующее за ней число обозначает мощность в мегаваттах (кроме генераторов ТВФ-120 и ТВВ-320, мощность которых равна 100 и 300 МВт); следующая цифра обозначает число полюсов; последние буква и цифра указывают на исполнение машины по климатическим условиям работы. Мощностью до 20 МВт производятся турбогенераторы серии Т с косвенным воздушным охлаждением по замкнутому циклу самовентиляции. Генераторы имеют исполнеиие по степени защиты IP43. Возбуждение осуществляется от бесщеточных возбудительных устройств серии БВУГ или электромашинных возбудителей серии ВТ. Генератор Т-20-2 возбуждается от электропреобразовательного агрегата АП-30.

Основные технические данные турбогенераторов серии Т представлены в табл. 27.9.

Более мощные турбогенераторы (мощностью свыше 50 МВт) изготавливаются с водородным или жидкостным охлаждением обмоток. К ним относятся генераторы серий ТВС, ТВФ, ТВВ, ТГВ и ТВМ, в которых для охлаждения активных частей используются различные хладоагенты (см. табл. 27.4). Общий вид турбогенератора ТВС показан на рнс. 27.31 и 27.32. Основные технические данные турбогенераторов с косвенным и непосредственным охлаждением приведены в табл. 27.10 и 27.11.

Т а б л и ц а 27.9. Технические данные турбогенераторов серии Т ($\cos\varphi = 0{,}8$; $f = 50$ Гц)

Тип	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	η, %	Возбуждение		Масса, т (не более)
				U_f, В	I_f, А	
Т-2,5-2	2,5	3,15; 6,3	97	83	243	12,5
Т-4-2	4	3,15; 6,3	97,3	113	274	15
Т-6-2	6	6,3; 10,5	97,6	140	248	20
Т-12-2	12	6,3; 10,5	97,6	234	247	27
Т-20-2	20	10,5	97,6	192	548	60

Примечание. Массв геиераторов указанв без учетв системы возбуждения.

27.13. ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

Значительная часть электроэнергии (до 10%) в СНГ вырабатывается гидрогенераторами, установленными на гидроэлектростанциях. Относительно небольшая частота вращения ($n = 50$÷600 об/мин в зависимости от напора воды) определяет большие размеры (до 20 м в диаметре) и массы (до 1500 т) активных и конструктивных частей гидрогенераторов. Как правило, гидрогенераторы выполняются с вертикальным расположеиием вала. Исключение

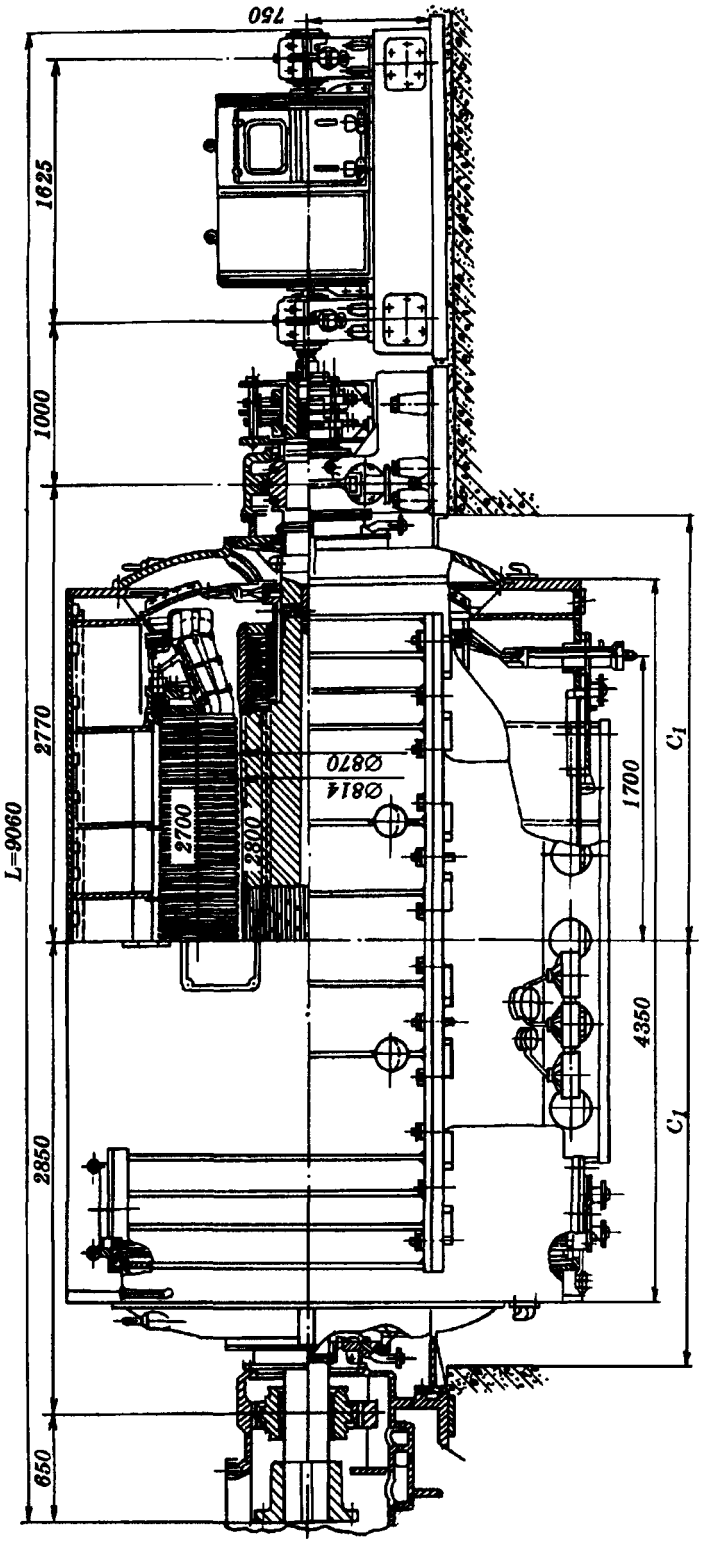


Рис. 27.31. Турбогенератор серии ТВС с косвенным водородным охлаждением (продольный разрез)

Таблица 27.10. Основные технические данные турбогенераторов серий ТВС, ТВФ, ТГВ, ТВМ, ТВВ

Тип	$P_{ном}$, МВт	$U_{ном}$, кВ	$\cos\varphi_{ном}$	η, %	Избыточное давление водорода, МПа	Индуктивные сопротивления, %					Постоянные времени, с				r_f, Ом (при 15 °С)	Токи возбуждения, А	
						X_d''	X_d'	X_d	X_2	X_0	T_d''	T_d'	T_f	T_a		I_{fx}	$I_{fном}$
ТВС-32-2	32	6,3; 10,5	0,8	98,3	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	490
ТВФ-63-2	63	6,3	0,8	98,4	0,2	20,3	30,2	191	24,8	10,2	—	—	6,2	—	0,103	538	1465
		10,5	0,8	98,4	0,2	15,3	26,8	218	18,6	8,8	—	—	8,9	—	0,103	462	1325
ТВФ-120-2	100	10,5	0,8	98,4	0,2	19,2	27,8	191	23,4	9,7	0,12	0,9	6,5	0,4	0,12	634	1715
ТВФ-110-2	110	10,5	0,8	98,4	0,25	18,9	27,1	204	23,0	10,6	0,03	0,89	6,7	0,41	0,126	620	1740
ТВВ-160-2	160	18	0,85	98,5	0,3	22,1	32,9	230	26,9	11,5	0,1	0,84	5,9	0,3	0,116	755	2300
ТВВ-200-2	200	15,75	0,85	98,6	0,3	18	27,2	211	22	10	0,1	0,9	7,0	0,3	0,088	920	2540
ТВВ-220-2	220	15,75	0,85	98,6	0,3	20	30	232	24	11	0,1	0,9	7,0	0,3	0,088	920	2740
ТВВ-320-2	300	20	0,85	98,7	0,4	17,3	25,8	167	21,1	8,8	0,1	0,9	5,9	0,4	0,115	1200	2900
ТВВ-500-2	500	20	0,85	98,7	0,45	24,2	35,5	256	29,5	14,1	0,16	1,28	9,2	0,34	0,1	1075	3530
ТВВ-800-2	800	24	0,9	98,75	0,5	21,9	30,7	233	26,7	11,7	0,15	1,23	9,3	0,33	0,12	1287	3790
ТВВ-1200-2	1200	24	0,9	98,8	0,5	24,8	35,8	242	30,2	15,2	0,18	1,42	8,5	0,38	0,051	2460	7530
ТВВ-1000-4	1000	24	0,9	98,7	0,5	32,4	45,8	241	39,5	14,9	0,22	1,7	9,1	0,34	0,05	2250	7020
ТГВ-200	200	15,75	0,85	98,6	0,3	19	29,5	184	23,2	8,4	0,14	1,1	6,9	0,55	0,174	720	1880
ТГВ-200М	200	15,75	0,85	98,6	0,3	21,3	32	190	26	9,14	0,14	1,09	6,5	0,32	0,174	710	1880
ТГВ-300	300	20	0,85	98,7	0,3	19,5	30	219	23,8	9,63	0,12	0,96	7,0	0,54	0,103	1060	3050
ТГВ-500	500	20	0,83	98,84	0,3	24,3	37,3	241	29,6	14,6	0,12	0,98	6,3	0,47	0,068	1605	5120
ТГВ-500-4	500	20	0,85	98,82	0,3	26,8	39,8	216	32,7	13	0,16	1,27	6,9	0,37	0,084	1500	4380
ТВМ-300	300	20	0,85	98,8	—	20,4	35,2	211	—	—	—	—	6,9	—	—	—	4420
ТВМ-500	500	36,75	0,85	98,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Обозначения: X_d — синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси; X'_d — переходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси; X''_d — сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной оси; T_f — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых обмотке якоря и демпферной обмотке; T'_d — переходная постоянная времени обмотки возбуждения; T_d'' — сверхпереходная постоянная времени обмотки возбуждения; T_a — постоянная времени обмотки якоря; X_2 — индуктивное сопротивление обратной последовательности обмотки якоря; X_0 — индуктивное сопротивление нулевой последовательности обмотки якоря; r_f — активное сопротивление обмотки возбуждения.

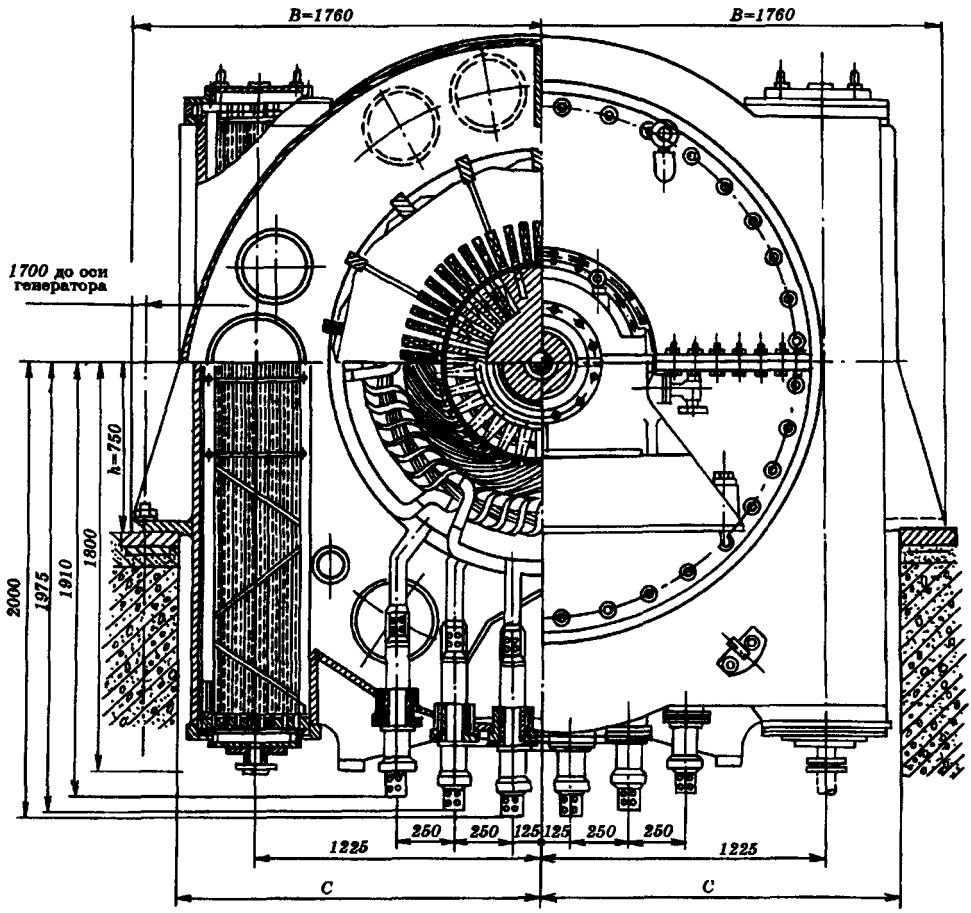


Рис. 27.32. Турбогенератор серии ТВС с косвенным водородным охлаждением (поперечный разрез)

Таблица 27.11. **Габаритные размеры и другие данные турбогенераторов серий ТВС, ТВФ, ТВВ, ТГВ и ТВМ**

Тип турбогенератора	Тип возбудителя	Размеры, м (см. рис. 27.31, 27.32)					Масса, т			Момент инерции ротора J, т·м^2	Критическая частота вращения, об/мин
		L	B	C_1	C	h	ротора	статора	общая		
ТВС-32-2	ВТС-170С-3000	8,88	1,76	—	—	0,75	—	—	78,4	—	—
ТВФ-63-2	ВТ-450-3000	10,3	1,96	2,7	1,65	0,92	25,4	89,4	140	2,4	—
ТВФ-120-2	ВТД-490-3000	11,38	1,98	3,08	1,8	0,92	30,8	113,5	177	3,25	—
ТВФ-110-2	ВТД-490-3000	11,15	1,88	3,0	1,7	0,92	28,9	94,7	145	—	—
ТВВ-160-2	ВТ-2350-2	12,65	1,88	3,03	1,7	0,92	30,8	115	167	4,45	1440/4300
ТВВ-200-2	ВТ-4000-2	13,88	1,98	3,55	1,8	0,92	41,8	170	269	5,28	1350/3400
ТВВ-220-2	ВТ-4000-2	13,88	1,98	3,55	1,8	0,92	41,8	170	269	5,28	1350/3400
ТВВ-320-2	ВТ-4000-2	15,92	2,35	4,52	2,15	0,92	55,1	202	376	7,44	900/2600
ТВВ-500-2	ВТ-5000-2	17,18	2,68	4,8	2,07	0,92	65	225	420	10,0	820/2330
ТВВ-800-2	ВТ-6000-2	19,3	2,78	5,35	2,0	0,92	84	322	589	16,0	680/1680
ТВВ-1200-2	БВД-4000-3000	25,16	3,2	6,02	2,0	0,92	104	410	717	—	—
ТВВ-1000-4	БВД-4600-1500	21,82	3,05	5,63	2,1	1,35	156	333	746	—	—
ТГВ-200	Тиристорная	11,68	2,36	4,86	1,90	0,92	48,1	201	291	—	—
ТГВ-200М	система самовозбуждения	11,68	2,35	4,86	1,90	0,92	48,1	170	254	—	—
ТГВ-300	СТВ-12БУ3	12,03	2,4	5,30	2,0	0,92	55,8	254	362	8,5	1280/3700

Окончание табл. 27.11

Тип турбогенератора	Тип возбудителя	Размеры, м (см. рис. 27.31, 27.32)					Масса, т			Момент инерции ротора J, т·м^2	Критическая частота вращения, об/мин
		L	B	C_1	C	h	ротора	статора	общая		
ТГВ-500	Тиристорная система независимого возбуждения	12,65	2,5	4,61	1,55	0,98	62	219	361	8,2	1230/4200
ТГВ-500-4	БТВ-500-4	14,13	2,81	4,50	1,65	1,35	154	240	500	—	—
ТВМ-300	ТВМ-1400-1000	19,77	2,02	4,45	1,58	0,92	54	224	393	6,4	936/2560
ТВМ-500	—	18,11	—	—	—	0,92	63,5	244	340	—	—

Примечание. Общая масса генераторов указана с учетом массы возбудителей.

составляют гидрогенераторы с большой частотой вращения и капсульные гидрогенераторы, которые выполняются горизонтальными.

Характерной особенностью конструкции вертикальных гидрогенераторов является наличие мощного опорного подшипника, называемого подпятником. В зависимости от расположения подпятника вертикальные гидрогенераторы бывают подвесными (подпятник расположен над ротором, рис. 27.33) и зонтичными (подпятник расположен ниже ротора, рис. 27.34).

Крупные гидрогенераторы изготавливаются по индивидуальным заказам. Различие в буквенных обозначениях типов крупных гидрогенераторов связано с их конструктивными особенностями и с принятой системой охлаждения (см. табл. 27.5). За

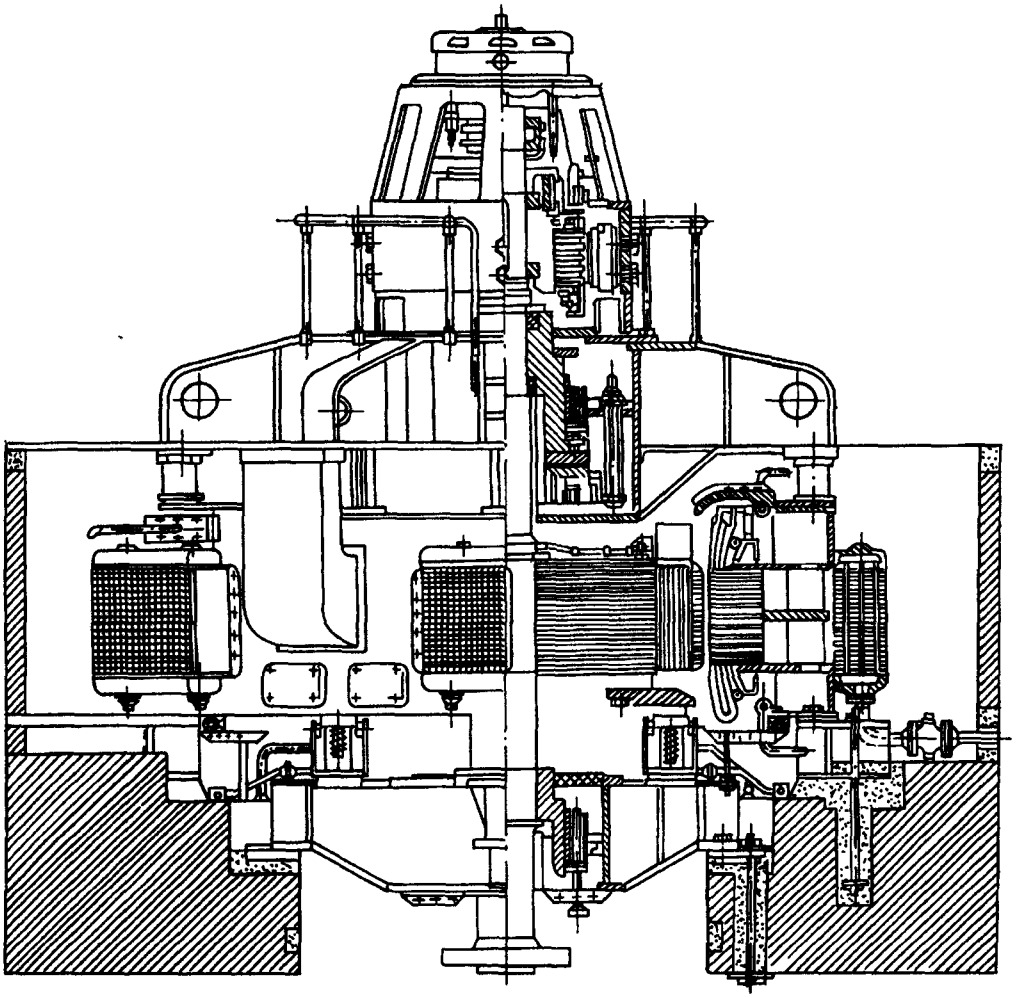


Рис. 27.33. Гидрогенератор в подвесном исполнении

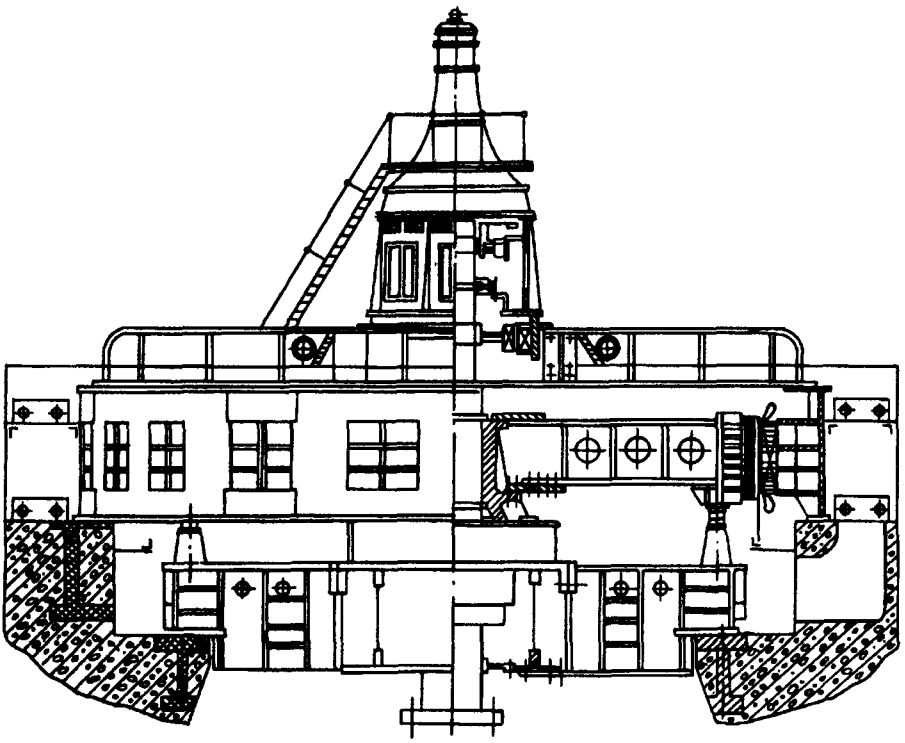


Рис. 27.34. Гидрогенератор в зонтичном исполнении

буквенным обозначением типа генератора следует дробное число, числитель которого равен внешнему диаметру сердечника статора, а знаменатель — длине сердечника статора в сантиметрах. Число после черточки означает количество полюсов машины.

Технические данные гидрогенераторов представлены в табл. 27.12

27.14. СИНХРОННЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ

Синхронные компенсаторы серий КС и КСВ (табл. 27.13) предназначаются для работы в качестве генераторов реактивной мощности и служат для улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения. Синхронные компенсаторы серии КС выполняются закрытыми с косвенным воздушным охлаждением и предназначаются для установки в закрытом помещении. Их вентиляция осуществляется по замкнутому циклу с охлаждением воздуха в водяных охладителях, расположенных в фундаментной яме. Компенсаторы серии КСВ (рис. 27. 35) имеют закрытое исполнение и охлаждаются водородом при избыточном давлении 0,1 МПа в КСВ-50 и 0,2 МПа в КСВ-100 и КСВ-160. Водород охлаждается в охладителях, размещенных в торцевых частях статора. Асинхронный пуск компенсаторов осуществляется при пониженном с помощью реактора напряжении (до 40% для КСВ-100 и КСВ-160 и до 50% для всех остальных компенсаторов).

На базе компенсаторов серии КСВ в настоящее время разработаны компенсаторы типов КСВБ и КСВБО (см. табл. 27.6), возбуждаемые от бесщеточных возбудителей (см. §27.4), пристроенных с торцов компенсаторов. Компенсаторы типа КСВБО имеют реверсивное возбуждение (положительное и отрицательное). Положительное возбуждение осуществляется, как и для компенсатора КСВБ, от возбудителя ВБД160-830У1, отрицательное — от возбудителя ВБДО160-145У1, который питает дополнительную обмотку возбуждения, расположенную на полюсах ротора компенсатора.

27.15. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ДВИГАТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Синхронные генераторы общего назначения, предназначеные для сопряжения с двигателями внутреннего сгорания (дизелями) и другими двигателями, выпускаются нескольких серий: ОС, ЕСС, ЕСС5, СГ2, СГД (10-й габарит), СГД2 и СГДС (15-й габарит).

Генераторы этих серий изготавливаются явнополюсными, горизонтальными, на двух щитовых или стояковых подшипниках (кроме генераторов серии СГД2; которые имеют одноопорное исполнение (рис. 27.36)), защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляции.

Машины серий СГД и СГДС имеют электромашинную систему возбуждения. Возбудитель приводится во вращение с помощью клиноременной передачи (рис. 27.37).

Генераторы серий ОС, ЕСС, ЕСС5, СГ2 и СГД2 имеют вентильные системы самовозбуждения с автоматическим регулированием напряжения.

Таблица 27.12. Технические данные некоторых гидрогенераторов серий СГК, СГКВ, СВ, СВФ, СВО, ВГС, ВГСФ, ВГСВФ

Тип	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{ном}$, кВ	$n_{ном}$, об/мин	cos φ	η, %	$\frac{n_{уг}}{n_{ном}}$	Индуктивные сопротивления, %						ОКЗ	T_f, с	Возбуждение		Исполнение	Масса, т		Момент инерции ротора J, т·м^2
							X_d	X_q	X_d'	X_d''	X_2	X_0			I_f, А	U_f, В		ротора	общая	
ВГС 440/69-28	9,4	10,5	214	0,8	96,1	2,15	97	—	32	21	—	—	1,1	—	436	185	Подвесное	52	108	100
СГКВ 480/115-64	20,0	3,15	93,8	1,0	96,3	2,81	194	—	57	45	45	—	—	—	950	295	Капсульное	62	170	162,5
ВГС 525/125-28	26,9	10,5	214	0,8	96,3	2,15	90	—	27	19	—	—	1,3	—	1050	145	Подвесное	116	241	325
СГК2 538/160-70	19,0	3,15	85,7	0,92	96,0	2,33	133	—	56	44	—	—	0,87	—	—	—	Капсульное	—	166	250
СВ 712/227-24	306	15,75	250	0,85	98,18	1,76	165	—	42,4	27,9	28,4	9,8	—	8,65	2400	310	Подвесное	388	818	2000
СВО 733/130-36	45,6	10,5	166,7	0,9	97,4	2,1	105	—	33	30	33	—	1,0	—	—	—	"	—	450	1270
ВГС 800/110-52	35	10,5	115,4	0,8	96,7	2,25	110	—	41	27	—	—	1,0	—	1020	210	Зонтичное	170	345	1450
СВ 808/130-40	64,7	10,5	150	0,85	97,7	2,05	93	63	35	22	22,2	8,2	—	—	1200	204	"	255	—	1875
ВГСФ 930/233-30	294	15,75	200	0,85	98,1	1,8	147	—	33	19	20	—	0,75	—	1880	308	Подвесное	560	1150	5375
ВГСВФ 940/235-30	353	15,75	200	0,85	98,2	1,8	131	85	38	24	25	—	0,81	9,7	2450	300	"	648	1250	6625
СВ 1070/145-52	110	13,8	115,4	0,8	97,6	1,8	110	—	34	22	—	—	1,0	—	—	—	Зонтичное	—	700	6000
СВ 1130/140-48	117,7	13,8	125	0,85	98,0	2,15	91	59	26	21	22	10	—	—	1300	191	"	—	—	7250
ВГС 1190/215-48	282,5	15,75	125	0,85	98,4	1,8	122	78	38	25	—	—	0,87	—	1500	370	"	650	1180	13700
ВГС 1260/147-68	97	13,8	88,25	0,85	97,5	1,8	76	—	28	21	—	—	1,47	—	1435	355	"	384	784	9250
СВФ 1285/275-42	711	15,75	142,8	0,9	98,3	1,96	158	97	43	29,5	30,5	15	—	8,2	3500	530	"	935	1790	25 400
СВ 1500/200-88	127,8	13,8	68,2	0,9	97,6	2,06	52	—	20	15	15	—	—	—	1820	380	"	765	1350	25 000
ВГС 1525/135-120	70,6	10,5	50	0,85	97,2	2,2	66	50	32	28	—	—	1,62	—	1300	480	"	500	850	18 300
СВФ 1690/175-64	590	15,75	93,8	0,85	98,2	1,65	160	100	42	30	31	15	—	5,2	3680	615	"	884	1650	46 750
ВГДС 1025/245-40	236	15,75	150	$\frac{0,85}{0,95}$	98,4	1,6	142	96	45	32	33	—	0,758	12,8	$\frac{1680}{1500}$	$\frac{240}{210}$	"	600	1100	8000
СВО 1170/190-36	$\frac{209}{228}$	15,75	166,7	$\frac{0,85}{0,94}$	$\frac{97,8}{98,1}$	1,58	122	—	32	18	—	—	$\frac{0,87}{0,81}$	—	—	—	"	—	950	7500
СВО 1120/190-32	$\frac{285}{290}$	15,75	187,5	$\frac{0,9}{1,0}$	$\frac{98,2}{98,4}$	1,5	102	—	32	17	—	—	1,0	—	—	—	"	—	1130	9500

Примечания: 1. Для обратимых машин типов СВО и ВГДС в числителе указаны данные для генераторного, а в знаменателе — для двигательного режимов.

2 $n_{уг}$ — угонная частота вращения

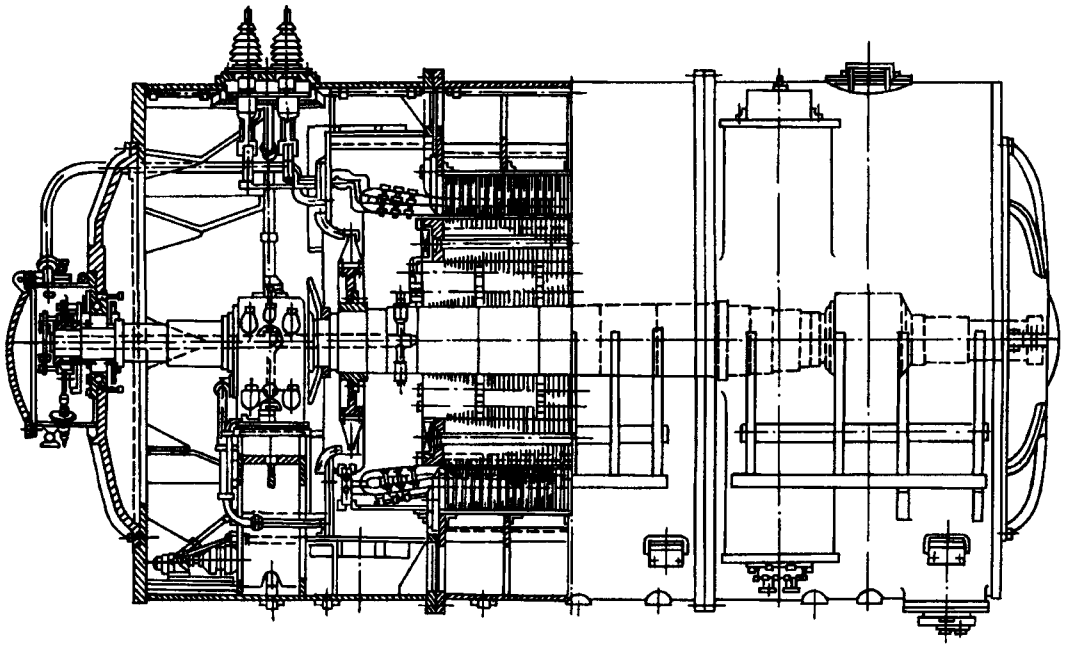


Рис. 27.35. Синхронный компенсатор с водородным охлаждением

Технические данные некоторых синхронных генераторов этих серий приводятся в табл. 27.14. Генераторы серии СГД2 выпускаются на напряжения 400 и 6300 В. Данные для генераторов на 400 В незначительно отличаются от данных генераторов на 6300 В, которые приведены в табл. 27.14.

Для всех типов генераторов последнее число в структурном обозначении (однозначное или двузначное) означает число полюсов машины.

Синхронные двигатели общего назначения применяются для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (вентиляторов,

Таблица 27.13. Технические данные синхронных компенсаторов серий КС и КСВ

Тип	$S_{ном}$, МВ·А	$U_{ном}$, кВ	$n_{ном}$, об/мин	Возбуждение				Масса, т		Потери, кВт	ОКЗ
				U_f, В	$I_{fном}$, А	I_{fx}, А	I_{fk}, А	ротора	общая		
КС 16-6	16	6,3	1000	110	590	240	280	18,5	49,7	360	0,88
КС 16-11	16	10,5	1000	110	580	220	300	18,5	50,2	370	0,75
КСВ 50-11	50	11	750	160	1160	300	700	46,5	144,5	800	0,4
КСВ 100-11	100	11	750	230	1350	405	730	77	220	1350	0,52
КСВ 160-15	160	15,75	750	380	1600	500	890	110	303	1750	0,53

Окончание табл. 27.13

Тип	Пусковые характеристики			Индуктивные сопротивления					T_f, с	Сопротивление обмоток при 15 °С, Ом		Момент инерции ротора, т·м^2
	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{0,05}}{M_{ном}}$	X_d	X_q	X'_d	X''_d	X_0		r_a	r_f	
КС 16-6	3	0,34	0,59	1,3	0,72	0,26	0,16	0,07	7,34	0,0073	0,13	4,0
КС 16-11	2,8	0,39	0,58	1,5	0,85	0,3	0,19	0,09	7,3	0,022	0,13	4,0
КСВ 50-11	4,0	0,8	0,75	2,7	1,5	0,47	0,28	0,14	9,1	—	—	31,3
КСВ 100-11	5,2	1,5	1,2	2,1	1,26	0,4	0,2	0,1	9,35	—	—	52,5
КСВ 160-15	2,3	0,28	0,47	2,0	1,3	0,43	0,205	0,13	8,7	—	—	75

Примечания: 1. В общую массу компенсаторов КСВ не включены массы систем возбуждения и аппаратуры водородного охлаждения. 2. Технические данные синхронных компенсаторов серий КСВБ и КСВБО такие же, как и у компенсаторов серии КСВ. 3. $M_{0,05}$ — вращающий момент при асинхроином пуске и скольжеиии $s = 0,05$.

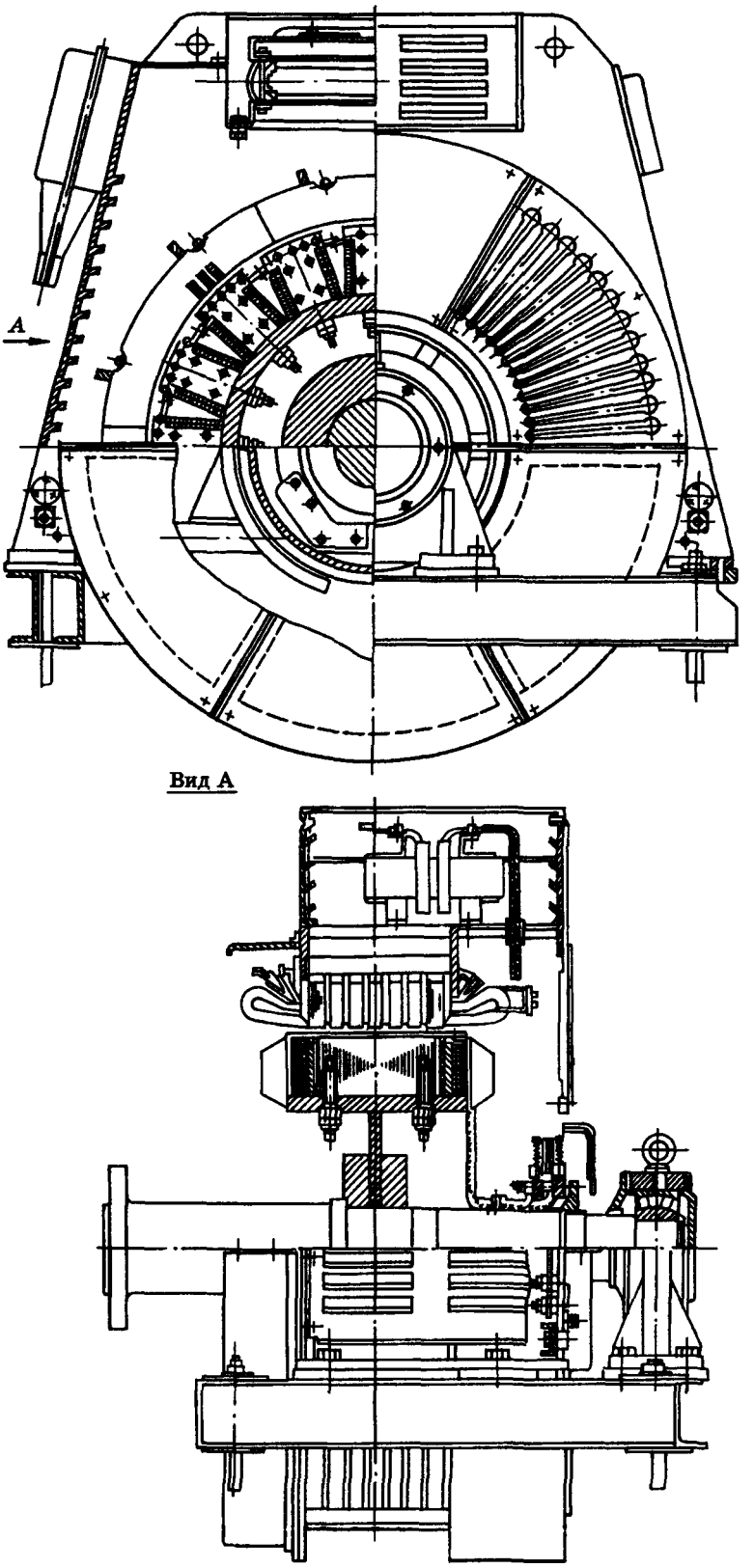


Рис. 27.36. Синхронный генератор серии СГД2 с вентильной системой возбуждения

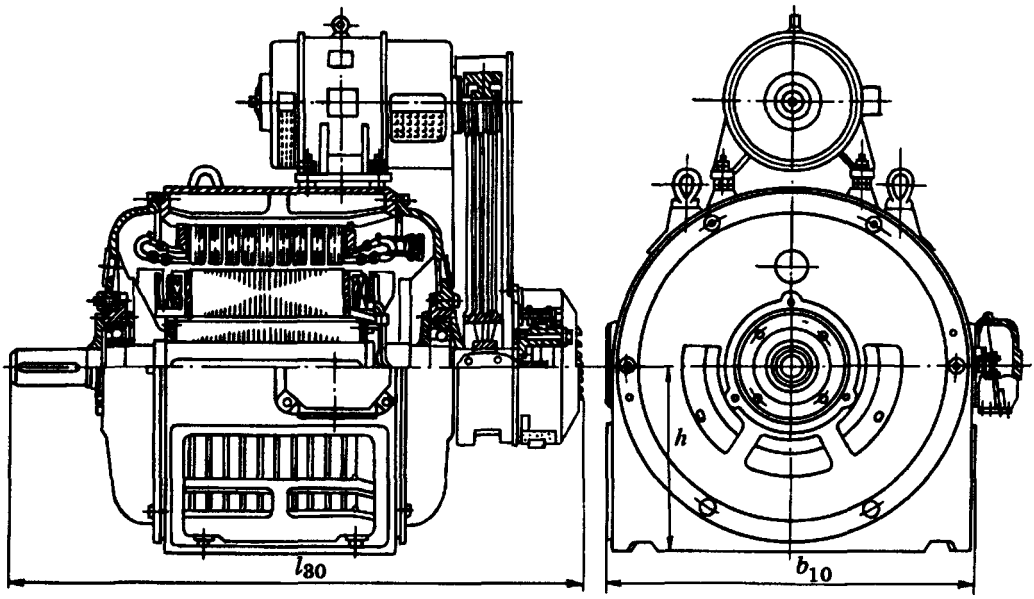


Рис. 27.37. Синхронный генератор серии СГД с электромашинным возбужденем

Таблица 27.14. Технические данные некоторых генераторов серий ЕСС, ЕСС5, СГД, СГД2, СГДС ($\cos\varphi = 0{,}8$; $f = 50$ Гц)

Тип	$S_{ном}$, кВ·А	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	ОКЗ	Возбуждение		Момент инерции ротора J, кг·м^2	Масса, кг		Размеры, м (см. рис. 27.37)		
					$U_{fном}$, В	$I_{fном}$, А		ротора	общая	l_{30}	b_{10}	h
ЕСС-52-4	6,25	1500	80,2	—	—	—	0,142	36	125	0,562	0,33	0,18
ЕСС-62-4	15	1500	86	—	—	—	0,35	65	238	0,693	0,39	0,20
ЕСС-82-4	37,5	1500	88	—	—	—	1,05	175	420	0,868	0,52	0,25
ЕСС-91-4	62,5	1500	90	—	—	—	1,87	185	590	0,933	0,60	0,315
ЕС5-61-4	10	1500	84,7	—	—	—	0,25	48	160	0,698	0,39	0,20
ЕС5-62-4	15	1500	85	—	—	—	0,35	65	189	0,742	0,39	0,20
ЕС5-81-4	25	1500	86	—	—	—	0,725	103	300	0,793	0,52	0,25
ЕС5-81-6	25	1000	86	—	—	—	1,15	125	300	0,793	0,52	0,25
ЕС5-82-4	37,5	1500	87,5	—	—	—	1,05	125	360	0,87	0,52	0,25
ЕС5-83-6	37,5	1000	88,2	—	—	—	1,675	175	360	0,87	0,52	0,25
ЕС5-91-4	62,5	1500	89,3	—	—	—	1,875	185	490	0,935	0,645	0,315
ЕС5-92-6	62,5	1000	89,6	—	—	—	2,85	229	540	0,935	0,645	0,315
ЕС5-92-4	75	1500	90,5	—	—	—	2,3	212	545	0,935	0,645	0,315
ЕСС5-93-4	93,7	1500	91	—	—	—	—	—	605	0,99	0,60	0,315
СГД102-8	93,7	750	89	—	—	118,5	—	—	1070	1,2	0,72	0,375
СГД103-4	250	1500	92,3	—	—	129	—	—	1550	1,46	0,72	0,375
СГ2-85/18-12	156	500	90,5	0,7	27	145	29	—	1670	1,26	1,005	0,50
СГ2-85/18-10	200	600	91,3	0,7	29	156	29	—	1640	1,26	1,005	0,50
СГ2-85/29-12	250	500	91,9	0,8	36	147	45	—	2120	1,37	1,005	0,50
СГ2-74/25-6	313	1000	93	0,6	31	179	17	—	1600	1,33	0,89	0,45
СГ2-85/29-10	313	600	92,6	0,7	38	153	45	—	2140	1,37	1,005	0,50
СГ2-85/45-12	394	500	92,7	0,7	49	147	70	—	2750	1,5	1,005	0,50
СГД2-17-24-16	500	375	92	0,85	41	216	287	—	4400	1,485	1,96	0,315
СГД2-17-29-16	625	375	92,6	0,95	50	236	338	—	4950	1,545	1,96	0,315
СГД2-17-36-16	790	375	93,5	0,85	55	222	400	—	5450	1,605	1,96	0,315
СГД2-17-44-16	1000	375	94	0,9	61	241	488	—	6200	1,605	1,96	0,315
СГДС-15-30-8	1250	375	94,3	—	50	323	—	—	7300	—	—	—
СГДС-15-54-8	2000	375	95	—	69	320	—	—	11 600	—	—	—
СГДС-15-74-8	2500	375	95	—	70	306	—	—	13 700	—	—	—

Примечание. Генераторы серий ЕСС и ЕСС5 имеют напряжение 230 или 400 В, генераторы СГД и СГ2 — 400 В, генераторы СГД2 — 400 или 6300 В, генераторы СГДС — 6300 В.

Таблица 27.15. Технические данные двигателей серий СД2, СДН2 и СДН32 ($\cos\varphi = 0{,}9$ при перевозбуждении, 50 Гц)

Тип	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	Пусковые данные			Возбуждение		Момент инерции ротора J, кг·м^2	Масса, т		Размеры, мм (см. рис. 27.37)		
						$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{0,05}}{M_{ном}}$	$U_{fном}$, В	$I_{fном}$, А		ротора	общая	l_{30}	b_{10}	h
СД2-85/18-12	132	380	500	90,9	1,7	4,5	1,0	0,8	25	137	29	—	1,67	1,26	1,005	0,5
СД2-85/29-12	200	380	500	92,4	1,7	5,0	1,1	0,9	32	129	45	—	2,12	1,37	1,005	0,5
СД2-85/29-10	250	380	600	93,2	1,7	5,5	1,2	1,1	33	133	45	—	2,14	1,37	1,005	0,5
СД2-85/40-10	315	6000	600	93,1	1,7	5,3	1,1	1,1	31	154	51	—	2,65	1,57	1,005	0,5
СД2-74/40-8	315	380	750	94,0	1,7	5,5	1,2	1,1	34	160	26	—	2,05	1,47	0,89	0,45
СД2-85/40-8	400	6000	750	93,9	1,7	5,5	0,9	1,3	33	161	48	—	2,70	1,57	1,005	0,5
СД2-85/47-8	500	6000	750	94,3	1,7	5,5	0,9	1,3	38	166	57	—	2,95	1,65	1,005	0,5
СД2-85/45-6	630	6000	1000	95,0	1,7	6,0	0,9	1,5	38	177	46	—	2,75	1,65	1,005	0,5
СД2-85/57-6	800	6000	1000	95,5	1,7	6,0	0,9	1,5	44	175	58	—	3,25	1,77	1,005	0,5
СД2-85/34-4	630	6000	1500	94,5	1,7	6,0	0,9	1,6	36	186	26	—	2,65	1,57	1,005	0,5
СД2-85/43-4	800	6000	1500	95,0	1,7	6,0	0,9	1,6	41	187	32	—	2,95	1,65	1,005	0,5
СД2-85/55-4	1000	6000	1500	95,5	1,7	6,0	0,9	1,6	47	183	40	—	—	1,77	1,005	0,5
17-26-20	315	6000	300	91,0	2,6	4,5	0,9	1,0	41	277	275	1,8	4,7	2,09	1,6	0,63
17-31-20	400	6000	300	91,7	2,7	4,5	0,75	1,0	46	296	318	2,1	5,5	2,15	1,6	0,63
СДН32-20-49-20	3200	6000	300	96,0	1,8	4,5	0,7	1,2	118	302	5500	—	24,5	3,75	3,7	0,63
17-26-16	500	6000	375	92,5	2,1	4,6	0,9	1,1	46	296	275	1,8	4,8	2,09	1,6	0,63
СДН32-19-39-16	1600	6000	375	95,3	2,1	6,5	0,9	1,6	77	280	2100	—	16,5	2,84	3,2	0,63
17-31-12	800	6000	500	94,3	1,9	4,7	1,0	1,1	46	298	310	2,2	5,6	2,21	1,6	0,63
17-31-16	630	6000	375	93,2	2,0	4,5	0,85	1,1	48	304	320	2,2	5,4	2,2	1,6	0,63
СДН2-18-64-12	2500	6000	500	96,2	1,8	6,5	1,5	1,4	77	260	1750	—	17,0	3,13	2,3	0,63
16-56-10	1000	6000	600	95,3	1,9	5,4	0,8	1,4	44	274	223	2,9	6,5	2,51	1,52	0,63
16-59-8	1250	6000	750	95,7	1,7	5,8	1,0	1,5	44	291	203	2,9	6,7	2,58	1,52	0,63
17-71-6	3150	6000	1000	96,9	1,7	6,6	1,3	1,4	58	281	435	4,7	10,9	2,85	1,6	0,63
17-89-6	4000	6000	1000	97,1	1,7	7,0	1,4	1,4	65	279	525	5,6	12,7	3,03	1,6	0,63

Примечания: 1. Для двигателей 16-го и 17-го габаритов серий СДН2 и СДН32 указана только цифровая часть обозначения типа двигателя. 2. 18-го габарита изготавливают только двигатели серий СДН2, 19-го и 20-го габаритов — только двигатели серии СДН32.

Таблица 27.16. Параметры и показатели турбогенераторов единой серии

$P_{ном}$, МВт	63	125	220	320	500	800
$\cos\varphi_{ном}$	0,8	0,8	0,85	0,85	0,85	0,9
$U_{ном}$, кВ	6,3/10,5	10,5	15,75	20	20	24
η, %	98,3÷98,4	98,4÷98,5	98,6÷98,7	98,7÷98,8	98,7÷98,8	98,75÷98,85
ОКЗ	0,47	0,42	≥0,4			
$X'_{d\text{ненасыщ}}$, %	≤35					
Расход материалов, кг/(кВ·А)	1,1÷1,2	1,0÷1,1	0,8÷0,85	0,7÷0,75	0,5÷0,65	0,5÷0,58
Статическая перегружаемость	1,7	1,7	1,65	1,6	1,6	1,5

насосов, мельниц и др.). Они выпускаются в виде серий СД2, СДН2, СДН32.

Двигатели серии СД2 выполняются на двух щитовых подшипниках, защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляции. Возбуждение осуществляется от тиристорного преобразователя, который питается от дополнительной обмотки якоря. Обозначение типа двигателей: числитель дробн — наружный диаметр сердечника статора; знаменатель — длина сердечника статора, последняя цифра — число полюсов машины.

Двигатели серин СДН2 и СДН32 выполняются на двух стояковых подшипниках. Возбуждение осуществляется от тирнсторных возбудителей сернн ТЕ8-320. Двигатели серии СДН2 выполняются защищенными, с воздушным охлаждением в режиме самовентиляцин, двигатели СДН32 — закрытымн, с принудительной вентиляцией по замкнутому циклу. Пуск двигателей — асинхронный от сети с номинальным напряжением. Структура обозначення (СДН3-2-ХХ-ХХ-ХХ): С — синхронный; Д — двигатель; Н — нормальный; З — закрытый; 2 — номер серии; ХХ — условное обозначение габарита (16÷20); ХХ — длнна сердечнника статора; ХХ— чнсло полюсов.

Технические данные некоторых типов снихронных двигателей общего назначения приводятся в табл. 27.15.

27.16. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ КРУПНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

В настоящее время общей тенденцией развитня тяжелого электромашиностроения является рост единичной мощности электроагрегатов. Увелнчение едннчной мощности турбо- и гидрогенераторов позволяет более полно нспользовать топливные и гидроресурсы, с наименьшимн затратами осуществлять ввод новых генернрующнх мощностей. Рост единичной мощности современных электрических машин может осуществляться за счет использования новых, более качественных электротехнических и конструкцнонных материалов, применения более эффективных систем охлаждения, а также за счет внедрения конструкцнй, основанных на новых физических принципах.

Турбогенераторы. В последнне годы как в нашей стране, так и за рубежом достигнуты большие успехи в турбогенераторостроении. В России освоен серийный выпуск турбогенераторов мощностью 500 н 800 МВт, 3000 об/мин, модернизированы с учетом последних достижений ранее освоенные машины мощностью до 300 МВт включительно. Внедрена единая серия двухполюсных турбогенераторов, показатели которой по техническому заданию должны соответствовать указанным в табл. 27.16.

С 1976 г. в России эксплуатнруется крупнейший в мире двухполюсный турбогенератор мощностью 1200 МВт. Генератор выполнен с непосредственным охлажденнем обмотки статора водой и обмотки ротора водородом. Аналогичные результаты достигнуты ведущнмн зарубежнымн фирмами. Так, в ФРГ н Швейцарии созданы двухполюсные турбогенераторы мощностью 1200 МВ·А, а в США — генератор мощностью 1120 МВ·А.

Непрерывный рост долн АЭС в общей структуре генернрующих мощностей требует создания мощных четырехполюсных турбогенераторов. В России создан турбогенератор мощностью 500 МВт с полным водяным охлажденнем (ТГВ-500-4) и турбогенератор мощностью 1000 МВт с охлаждением обмотки ротора водородом и обмотки статора водой. Во Францнн изготовлен крупнейший четырехполюсный турбогенератор мощностью 1480 МВт, в ФРГ — генераторы мощностью 1360 и 1200 МВт. Аналогичные по классу четырехполюсные турбогенераторы изготавливаются в США.

Дальнейшее увеличение еднной мощности возможно за счет совершенствования системы охлаждення, например путем применення полного водяного охлаждения, а также за счет освоення производства роторных поковок диаметром 1,35÷1,4 м, длиной до 11 м. В настоящее время в Россни созданы н эксплуатируются два турбогенератора с полным водяным охлаждением мощностью 800 МВт, 3000 об/мин (ТЗВ-800-2).

Гидрогенераторы. Большие успехи достигнуты и в области гидрогенераторостроения. В нанболее мощных гидрогенераторах, созданных в последнее время в Россни для Красноярской ГЭС (590 МВ·А, 90 об/мин) и Саяно-Шушенской ГЭС (711 МВ·А, 142 об/мин), применено непосредственное охлаждение обмотки статора водой н форснрованное охлаждение обмотки ротора воздухом. Перспективным направлением с точки зрения увеличення единичной мощностн гидрогенераторов является примененне полного водяного охлаждення. В России изготовлен генератор мощностью 353 МВ·А, 200 об/мин, с водяным охлажденнем обмоток статора н ротора н

Таблица 27.17. Технические данные крупных гидрогенераторов

Показатели	Наименование ГЭС						
	Черчилл Фоллс, Канада	Грэнд-Кули II, США	Гури II, Венесуэла	Красноярская, Россия	Саяно-Шушенская, Россия	Нурекская, Таджикистан	Рогунская (проект), Таджикистан
Изготовитель	Альстом, Франция	Вестингауз, США	Тосиба, Хитачи, Сименс	Электросила	Электросила	УЭТМ	УЭТМ
Мощность, МВ·А/МВт	500/475	615/600	700/630	590/500	711/640	353/300	666/600
Частота вращения, об/мин	200	72	112,5	93,8	142,8	200	166,7
Частота, 1/с	60	60	60	50	50	50	50
Напряжение, кВ	15	15	18	15,75	15,75	15,75	15,75
Коэффициент мощности	0,95	0,95	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9
Коэффициент угона	1,65	—	1,9	1,65	1,95	1,8	1,8
Система охлаждения обмотки статора	Воздух	Воздух	Воздух	Вода	Вода	Вода	Вода
Система охлаждения обмотки ротора	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Вода	Вода
Система охлаждения сердечника статора	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух	Вода
Синхронное индуктивное сопротивление	—	—	—	1,6	1,58	1,3	1,3
Переходное индуктивное сопротивление	—	0,3	0,315	0,42	0,43	0,38	0,37
Инерционная постоянная, с	7,6	9,9	7,6	7,6	7,6	8,2	7,4
Нагрузка на подпятник, т	1400	4100	—	2600	3250	1720	2980
Коэффициент Эссона	10	4,1	8,8	13,3	12,9	10,6	13,2
Общая масса, т	1000	3383	—	1650	1860	1250	1850
КПД, %	—	98,37	98	97,65	98,3	98,3	98,7

воздушным охлаждением сердечника статора для Нурекской ГЭС, создается генератор мощностью 667 МВ·А, 167 об/мин, с полным водяным охлаждением для Рогунской ГЭС. За рубежом также имеется опыт применения полного водяного охлаждения в гидрогенераторостроенин. В Швеции создан генератор мощностью 190 МВ·А, 375 об/мин. Предполагается, что примененне полного водяного охлаждения позволнт в дальнейшем увеличить единичную мощность гидрогенераторов до 1000 МВт.

Во многих странах (США, Японин, ФРГ и др.) получает развитие строительство мощных гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), предназначенных для покрытия пиковых нагрузок. Для ГАЭС применяются обратимые гидрогенераторы-двигатели. В России построена крупная Загорская ГАЭС, на которой установлены обратнмые гидрогенераторы-двигатели ВГДС 1025/245-40 мощностью 200 МВт, 150 об/мин.

Представление о наиболее крупных гидрогеиераторах, построенных в России и некоторых других странах, дает табл. 27.17.

Синхронные компенсаторы. В настоящее время в Россни освоен серийный выпуск синхроиных компенсаторов с водородным охлаждением мощностью 160 МВ·А. Применение полного водяного охлаждения позволило шведской фирме создать синхронный компенсатор мощностью 345 МВ·А, 900 об/мин. Также ведутся работы по созданию синхронных компенсаторов с водяным охлаждением мощностью 350 МВ·А. Прнменение водяного охлаждения дает возможность выполнить эти машины в габаритах синхронных компенсаторов с водородным охлаждением мощностью 160 МВ·А.

Раздел 28

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

СОДЕРЖАНИЕ

28.1. Принцип действия машины постоянного тока 224
28.2. Назначение и области применения машин постоянного тока 225
Машина с независимым возбуждением (225). Машина параллельного возбуждения (225). Машина последовательного возбуждения (226). Машина со смешанным возбуждением (226).
28.3. Конструкция машины постоянного тока 226
28.4. ЭДС, МДС и сопротивления обмоток 228
28.5. Расчет магнитной цепи при холостом ходе 229
28.6. Расчет магнитной цепи при нагрузке 230
28.7. Уравнение напряжений. Вращающий момент 230
28.8. Характеристики генераторов постоянного тока 231
28.9. Характеристики двигателей постоянного тока 233
28.10. Общие сведения о сериях машин постоянного тока 233
28.11. Двигатели постоянного тока единой серии 2П мощностью до 200 кВт 233
28.12. Металлургические и крановые двигатели постоянного тока серии Д 235

28.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машиной постоянного тока в соответствии с общепринятой терминологией называют двухобмоточную электрическую машину, одна из обмоток которой (обмотка якоря) соединяется с электрической сетью постоянного тока с помощью механического преобразователя частоты, преобразующего переменный ток в якоре в постоянный ток в сети, а вторая (обмотка возбуждения) питается постоянным током.

В последние десятилетия для преобразования переменного тока, индуктируемого в якоре машины постоянного тока, часто используется вместо механического преобразователя частоты полупроводниковый преобразователь частоты, в котором используются управляемые и неуправляемые полупроводниковые вентили. Такие электрические машины постоянного тока получили название вентильных (см. разд. 29).

Для упрощения конструкции механического преобразователя частоты машина постоянного тока должна иметь обращенное исполнение: обмотка возбуждения, питаемая постоянным током, располагается на статоре; обмотка якоря, в которой при вращении индуктируется переменная ЭДС — на роторе. Это дает возможность выполнить преобразователь частоты в виде вращающегося коллектора, к пластинам которого присоединены выводы от секций обмотки якоря, и системы неподвижных щеток, контактирующих с пластинами коллектора. Коллектор в зависимости от режима работы машины выполняет функцию механического инвертора или выпрямителя. Отвод и подвод электрической энергии к обмотке якоря осуществляются с помощью щеток, которые удерживаются в контакте с коллектором щеткодержателями.

Принцип действия машины постоянного тока иллюстрируется рис. 28.1. При разомкнутой обмотке якоря ($I_я = 0$) магнитное поле в машине создается только МДС обмотки возбуждения, по которой протекает постоянный ток $I_в$. При вращении якоря с

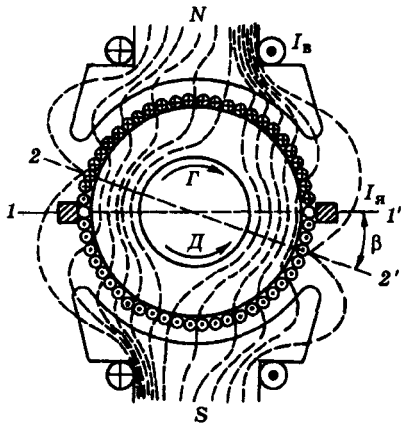


Рис. 28.1

частотой n в его обмотке индуктируется переменная ЭДС частотой f, где $f = p\Omega/2\pi$; $\Omega = \pi n/30$.

Переменная ЭДС при помощи коллектора и механических щеток выпрямляется.

При подключении к щеткам активной нагрузки или сети постоянного тока в обмотке якоря появляется ток, значение и направление которого зависят от соотношения между ЭДС и напряжением сети. При работе в генераторном режиме (вращение по стрелке $Г$ на рис. 28.1) ЭДС больше, чем напряжение сети ($E > U$), ток якоря совпадает по направлению с ЭДС и механическая энергия, подводимая через вал машины, преобразуется в электрическую энергию, поступающую в сеть.

При работе в режиме двигателя (вращение по стрелке $Д$) ЭДС, индуктированная в обмотке якоря, меньше, чем напряжение сети ($E < U$), ток якоря совпадает по направлению с напряжением сети, а электрическая энергия, поступающая из сети, преобразуется в механическую энергию, передаваемую через вал сопряженному с ним механизму.

Когда машина нагружена и работает в режиме двигателя или генератора ($I_я \neq 0$), магнитное поле

в ней создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря. Картина магнитного поля машины при нагрузке показана на рис. 28.1, из которого видно, что линия $2-2'$, проходящая через точки на поверхности якоря, в которых индукция равна нулю (физическая нейтраль), смещается на угол β по отношению к поперечной оси машины $1-1'$ (геометрическая нейтраль).

28.2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока, несмотря на то что они значительно дороже асинхронных двигателей, находят широкое применение для привода различных механизмов, так как позволяют осуществлять плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне и получать специальные механические характеристики.

Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге, в приводе подъемных устройств, для привода металлорежущих станков. Мощные двигатели постояниого тока применяются для привода прокатных станов н на судах для вращення гребных внитов.

Постоянный ток для питания двигателей получается с помощью генераторов постоянного тока или выпрямительных устаиовок, преобразующих переменный ток в постоянный.

Генераторы постоянного тока являются источнн-ком питания для промышленных установок, потребляющих постоянный ток низкого напряжения (электролизные и гальванические установки).

Питание обмоток возбуждения мощных синхронных генераторов осуществляется во многих случаях от генераторов постоянного тока (возбудителей, см. § 27.4).

Широко также распространены генераторы постоянного тока специального исполнения, обладающие особыми свойствами (сварочные, генераторы для освещения поездов, ЭМУ и пр.).

В зависимостн от схемы питания обмотки возбуждения машины постоянного тока разделяются на несколько типов.

На рис. 28.2 приведены схемы соединения обмоток и характеристики машин постоянного тока с независимым, параллельным, последовательным н смешанным возбуждеиием (на рисунке не показаны пусковые и регулировочные реостаты в цепи обмотки возбуждения).

Далее даны краткие сведения о свойствах основных типов двигателей и генератора постоянного тока.

МАШИНА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Обмотка возбуждения машины питается от постороиiего источника постоянного тока (см. рнс. 28.2). Машины с независимым возбуждением применяются в качестве генераторов с весьма широкими пределами регулирования напряжения (от $U = 0$ до $U_{ном}$ и выше). Двнгатели с незавнсимым возбуждением нспользуются в схеме генератор—двигатель, в которой регулирование частоты вращения двигателя осуществляется путем изменения напряжения на его выводах.

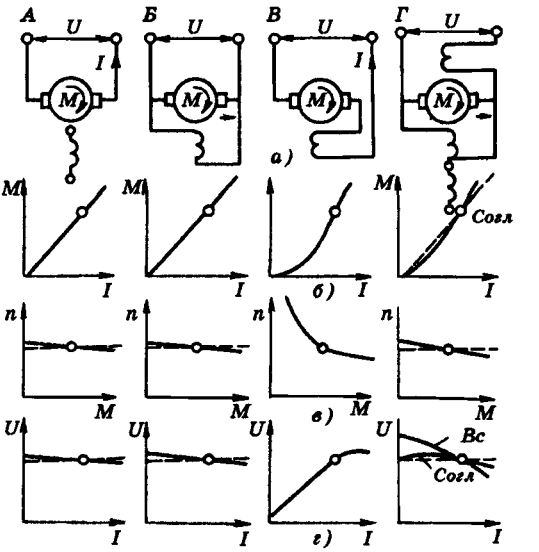


Рис. 28.2. Схемы возбуждения и основные свойства машин постоянного тока

а — схемы: *А* — независимое возбуждение; *Б* — параллельное возбуждение; *В* — последовательное возбуждение; *Г* — смешанное возбуждение; *б* — зависимость вращающего момента на валу от тока якоря в режиме двигателя; *в* — механическая характеристика в режиме двигателя; *г* — внешняя характеристика в режиме генератора; *Согл* — согласное включение параллельной и последовательной обмоток; *Вс* — встречное включение; о — точка на характеристике, соответствующая номинальному режиму работы

Машины с независимым возбуждением при постоянном напряжении на выводах якоря имеют такие же свойства, как и машины с параллельным возбуждением.

МАШИНА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения машины включена параллельно выводам якоря (см. рис. 28.2). Частота вращения двигателей при постоянном напряжении мало завнсит от нагрузки и уменьшается на 2÷8% при переходе от холостого хода к номинальному режиму. Частота вращения двигателей может быть изменена в пределах 1:1,5 (1:3) путем регулнрования тока с помощью реостата в цепи обмотки возбуждення. Частота вращення двигателя при увеличении температуры окружающей среды на 50 °С может возрастать на 5÷10%. С целью расширения пределов регулнрования частоты вращения двигатель

снабжают небольшой последовательной (стабилизирующей) или компенсационной обмоткой.

Напряжение генераторов с параллельным возбуждением увеличивается при сбросе номинальной нагрузки на 5÷25% и может регулироваться путем изменения сопротивления в цепи возбуждения в пределах 1:1,3 (1:1,5).

МАШИНА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения машины включена последовательно с якорем (см. рис. 28.2). Машина с последовательным возбуждением применяется главным образом в качестве двигателя для подъемных устройств, в электрической тяге и металлургии.

Частота вращения двигателя при изменении мощности от номинальной до 1/4 номинальной увеличивается примерно в 1,5÷2 раза. Уменьшения момента на валу двигателя до нуля нельзя допускать, так как при этом частота вращения двигателя может настолько возрасти, что он будет разрушен. Обычно допускается нагрузка не ниже $0{,}2P_{ном}$. Путем шунтирования обмотки возбуждения и введения сопротивления в цепи якоря частота вращения двигателя может регулироваться в широких пределах. Генераторы последовательного возбуждения применяются только в специальных установках (например, тепловозах).

МАШИНА СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Наиболее часто имеет только параллельную и последовательную обмотки (см. рис. 28.2). Двигатели с согласно включенной последовательной обмоткой имеют более мягкую механическую характеристику, чем двигатели с параллельным возбуждением, но более жесткую, чем двигатели с последовательным возбуждением.

Изменение напряжения генератора при согласном включении последовательной обмотки может быть уменьшено по сравнению с напряжением генератора параллельного возбуждения.

При встречном включении последовательной обмотки внешняя характеристика смягчается. Генераторы для возбуждения крупных синхронных машин с целью расширения пределов регулирования возбуждения снабжают независимой, параллельной и последовательной обмотками.

28.3. КОНСТРУКЦИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Конструкция машины постоянного тока показана на рис. 28.3.

Статор машины (рис. 28.4) состоит из станины *1*, сердечников главных *7* и дополнительных *9* полюсов и обмоток возбуждения, катушки которых охватывают сердечники полюсов. Число главных полюсов зависит от мощности и частоты вращения. Обычно имеется четыре или шесть полюсов: в микромашинах — два, в очень крупных машинах — до нескольких десятков. На рис. 28.4 показан статор четырехполюсной машины. Сердечники главных полюсов *1* собираются из листов конструкционной стали толщиной 1÷2 мм, стянутых шпильками *8*. Их крепление к станине осуществляется в данном случае с помощью шпилек *9*, ввернутых в тело сердечника, и гаек *10*.

Сердечники дополнительных полюсов выполнены стальными массивными. Они крепятся к станине болтами *4*. На главных полюсах устанавливаются катушки одной или нескольких обмоток возбуждения (последовательная обмотка возбуждения *2* обтекается выпрямленным током якоря, параллельная *7* включается на щетки якоря, независимая питается от внешней сети постоянного тока). Катушки дополнительных полюсов *5* включаются последовательно с обмоткой якоря.

Магнитопровод якоря (рис. 28.5) состоит из одного (поз. *2*) или нескольких пакетов, набранных из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Между пакетами имеются радиальные вентиляционные каналы (на рис. 28.5 не

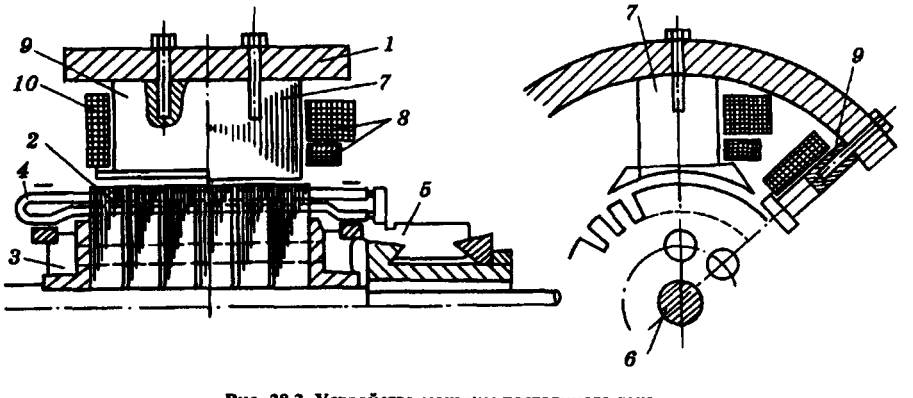


Рис. 28.3. Устройство машины постоянного тока

1 — станина; *2* — пакет магнитопровода якоря; *3* — обмоткодержатель; *4* — обмотки якоря; *5* — коллектор; *6* — вал; *7* — сердечник главного полюса; *8* — обмотки возбуждения; *9* — сердечник дополнительного полюса; *10* — обмотки дополнительного полюса

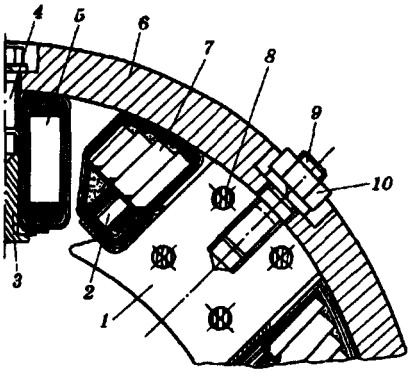


Рис. 28.4. Статор машины постоянного тока

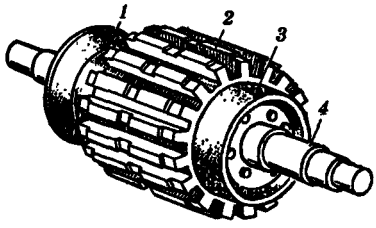


Рис. 28.5. Необмотанный якорь

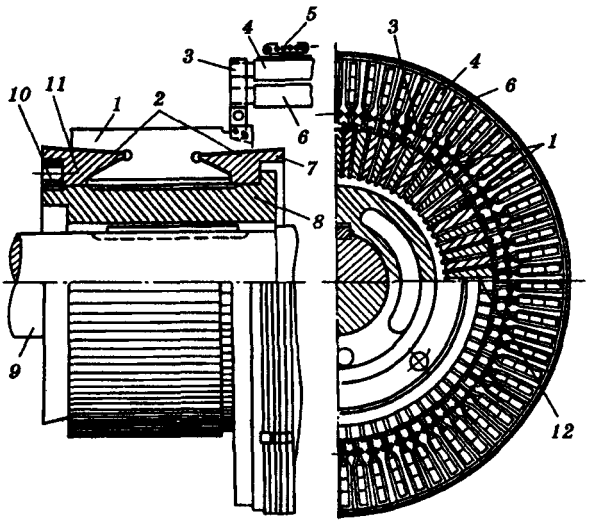


Рис. 28.7. Присоединение секцнй обмотки якоря к коллектору

предусмотрены). Магнитопровод удерживается в спрессованном состоянии нажимными кольцами *1* и *3*, играющими одновременно роль обмоткодержателей. Магнитопровод якоря напрессовывается либо непосредственно на вал *4* (как на рис. 28.5), либо на звездообразную втулку. При внешнем диаметре $D > 100$ см магнитопровод собирается из сегментов.

В пазы магнитопровода якоря укладываются изолированные секции двухслойной якорной обмотки, нижние стороны которых располагаются на дне пазов, верхние — в следующем слое (рис. 28.6). Выводы секций *4*, *6* (рис. 28.7) впаиваются в петушки-обоймы *3* коллекторных пластин *1*. Центробежная сила выводов *4*, *6* воспринимается бандажом *5*. Таким образом, вывод *6* нижней стороны одной из секций соединяется с выводом *4* верхней стороны другой секции и все секции объединяются в замкнутую на себя обмотку.

Коллектор (рис. 28.7) состоит из ряда коллекторных пластин *1*, изготовленных из меди. Пластины изолируются одна от другой с помощью прокладок *12* из миканита и от корпуса с помощью конусных и цилиндрических миканитовых шайб *2*. Пакет коллекторных пластин удерживается в запрессованном состоянии с помощью втулки *8* и конусных нажимных шайб *7* и *11*, которые фиксируются гайкой *10*. Коллектор в сборе напрессовывается на вал *9*, и его наружная поверхность обрабатывается окончательно совместно с поверхностями для посадки подшипников. Такая обработка придает коллектору правильную цилиндрическую форму.

Электрический контакт между обмоткой якоря и сетью постоянного тока образуется с помощью системы *щеток*, установленных в *щеткодержателях* (рис. 28.8). В конструкции щеткодержателя предусматриваются возможность регулирования давления в контакте и автоматическое поддержание давления по мере износа щетки. В тангенциальном направлении щетка обычно перекрывает две-три коллекторные пластины. В осевом направлении длина щетки не превышает 3÷4 см, и для получения допустимой плотности тока в скользящем контакте на одном щеточном пальце устанавливают рядом несколько щеткодержателей. Общее число щеточных пальцев равно числу полюсов (половина из них имеет положительную полярность, остальные — отрицательную). Пальцы щеткодержателей закрепляются в

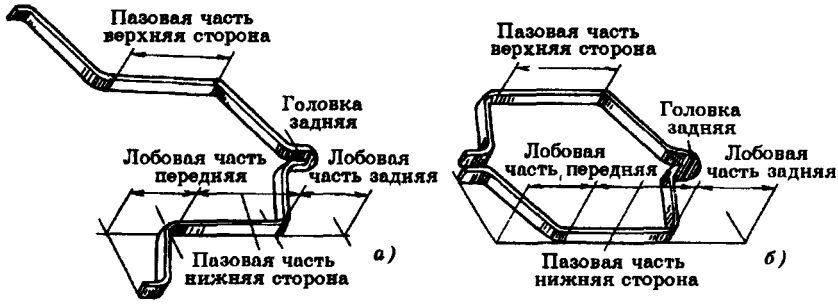


Рис. 28.6. Одновитковые секцни обмотки якоря
а — волновая обмотка; *б* — петлевая обмотка

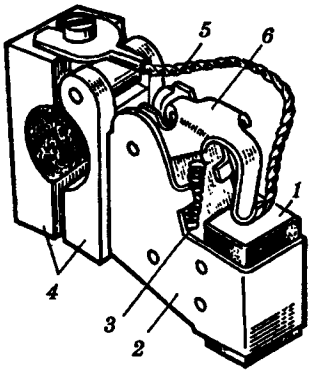


Рис. 28.8. Щеткодержатель

1 — щетка; *2* — обойма; *3* — пружина; *4* — зажим для крепления к щеточному пальцу; *5* — гибкий токоподвод к щетке; *6* — нажимной кронштейн

траверсе и изолируются от последней изоляционными втулками. Траверса, в свою очередь, крепится к подшипниковому щиту или к станине (в машинах со стояковыми подшипниками). Щеточные пальцы одной полярности соединяются сборными шинами.

28.4. ЭДС, МДС И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

ЭДС на щетках якоря, В,

$$E = \frac{p\,\Omega}{2\pi}\frac{N}{a}\Phi = 4f\,w\,\Phi = c_e\Omega\,\Phi,$$

где N — число эффективных проводов якоря; $w = N/4a$ — число витков в параллельной ветви якоря; $f = p\,\Omega\,/2\pi$ — частота; $\Omega = \pi n/30$ — угловая скорость якоря, рад/с; n — частота вращения, об/мин; Φ — магнитный поток на один полюс; $c_e = pn/2\pi a$ — постоянная машины; a — число параллельных ветвей.

Примечание. Здесь и в дальнейшем, если это особо не оговорено, предполагается, что щетки установлены на геометрической нейтрали.

МДС полюсных и якорной обмоток на один полюс. Параллельная (или независимая) обмотка возбуждения создает продольное поле с МДС

$$F_в = I_в w_в.$$

Последовательная обмотка возбуждения создает продольное поле с МДС

$$F_п = I_п w_п = I_я w_п.$$

Обмотка дополнительных полюсов образует поперечное поле

$$F_д = I_я w_д.$$

Здесь $w_в$, $w_п$, $w_д$ — число витков на один полюс.

Наибольшее значение МДС якоря (рис. 28.9)

$$F_{я\,max} = A\tau/2,$$

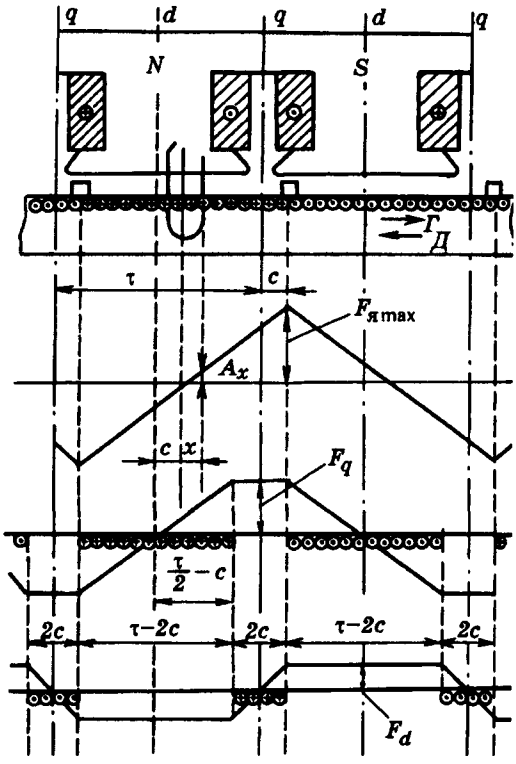


Рис. 28.9. Диаграмма МДС якоря и ее составляющих при щетках, сдвинутых с геометрической нейтрали

где $A = NI_я/(2a\tau D)$ — линейная нагрузка якоря; D — диаметр якоря; $\tau = \pi D/(2p)$ — полюсное деление.

Наибольшее значение поперечной МДС якоря

$$F_q = \left(\frac{\tau}{2} - c\right)A,$$

где $c = \beta D/2$ — сдвиг щеток с геометрической нейтрали (см. рис. 28.9); β — см. рис. 28.1.

Наибольшее значение продольной МДС якоря

$$F_d = cA.$$

Примечание. При щетках на геометрической нейтрали

$$F_q = F_{я\,max};\ F_d = 0.$$

Сопротивление обмотки якоря при температуре t

$$R_я = \rho_t \frac{L}{S(2a)},$$

где $L = \frac{N}{2a} l_{ср} = 2wl_{ср}$ — длина проводников одной параллельной ветви; $l_{ср}$ — средняя длина полувитка ($l_{ср} \approx l + 1{,}4\tau$); ρ_t — удельное электрическое сопротивление проводников обмотки при температуре t; S — сечение эффективного провода обмотки якоря, $S = c_э S_э$; $S_э$ — сечение элементарного провод-

ника; $c_э$ — число элементарных проводников в эффективном проводе.

Сопротивление параллельной обмотки при t, °С, и последовательном соединении катушек

$$r_в = \rho_t \frac{4pl_в w_в}{S_в},$$

где $l_в$ — средняя длина полувитка обмотки; $S_в$ — сечение провода.

Примечание. Сопротивления других полюсных обмоток подсчитываются по аналогичной формуле.

Сопротивление цепи якоря с учетом сопротивления последовательно включенных обмоток и переходного сопротивления в щеточном контакте

$$r_я = R_я + r_п + r_д + r_{к.п} + \Delta U_щ / I_{я.ном},$$

где $\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения на паре щеток; $r_п$ — сопротивление последовательной обмотки; $r_д$ — сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $r_{к.п}$ — сопротивление компенсационной обмотки.

28.5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

При расчете магнитной цепи индукции и магнитные напряжения ее участков определяются для магнитных потоков $Ф_в$, равных $0{,}5Ф_{в.ном}$; $0{,}8Ф_{в.ном}$; $1{,}1Ф_{в.ном}$; $1{,}25Ф_{в.ном}$ и $Ф_{ном}$.

Магнитный поток $Ф_{в.ном}$ при холостом ходе, номинальной частоте вращения $n_{ном}$ и напряжении $E = U_{ном}$ определяется как:

$$Ф_{в.ном} = \frac{2\pi a U_{ном}}{p\Omega N} = \frac{U_{ном}}{c_e \Omega}.$$

Магнитный поток при номинальной нагрузке

$$Ф_{ном} = k_E Ф_{в.ном},$$

где $k_E = E_{ном}/U_{ном}$; $E_{ном}$ — ЭДС при номинальной нагрузке.

Максимальная индукция в воздушном зазоре при холостом ходе и потоке $Ф_в$

$$B_δ = Ф_в/(\alpha_δ \tau l_δ),$$

где $\alpha_δ = b_δ/\tau \approx (b_p + 2\delta)/\tau$ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия; δ — зазор между главным полюсом и якорем; b_p — ширина полюсного наконечника (по окружности зазора); $b_δ$ — расчетная полюсная дуга; $l_δ$ — расчетная длина машины; τ — полюсное деление.

В результате расчета магнитной цепи при холостом ходе определяется результирующая МДС магнитной цепи при холостом ходе (на один полюс)

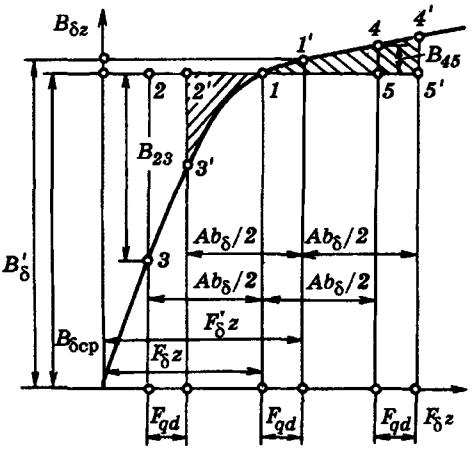


Рис. 28.10. Определение размагничивающего действия поперечной МДС якоря по переходной характеристике

$$F_в = F_{δ12} + F_{δm} + F_z + F_m + F_a + F_s,$$

где $F_{δ12}$, F_z, F_a — магнитные напряжения воздушного зазора, зубцов и ярма якоря; F_m, $F_{δm}$ F_s — магнитные напряжения полюсов, подполюсных зазоров и ярма станины.

Дополнительно определяется результирующее магнитное напряжение воздушного зазора, зубцов и ярма якоря (на один полюс)

$$F_{δz} = F_{δ12} + F_z + F_a.$$

По данным расчета магнитной цепи при холостом ходе могут быть построены следующие характеристики:

а) переходная характеристика (рис. 28.10),

$$B_δ = f(F_{δz});$$

б) характеристика намагничивания (рис. 28.11),

$$Ф_в = Ф = f(F_в);$$

в) характеристика холостого хода (рис. 28.12),

$$E_в = E = f(F_в).$$

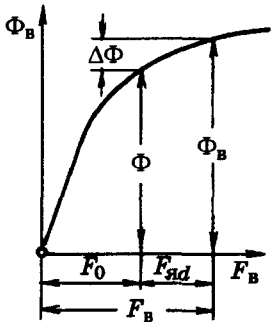


Рис. 28.11. Характеристика намагничивания машин постоянного тока

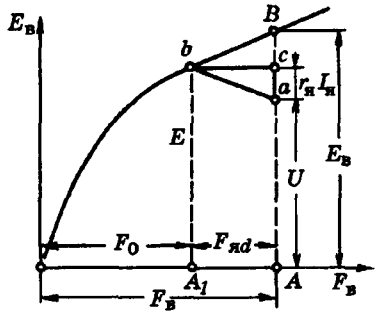


Рис. 28.12. Определение напряжения U или МДС возбуждения $F_в$ по характеристике холостого хода

28.6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ НАГРУЗКЕ

При включении машины постоянного тока на нагрузку по обмотке якоря протекает ток ($I_я \neq 0$) и магнитное поле в машине создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря.

Если щетки установлены на геометрической нейтрали (см. рис. 28.9, $c = 0$), то МДС якоря создает поле, направленное по поперечной оси (поперечная реакция якоря). При сложении с полем обмотки возбуждения поле поперечной реакции якоря увеличивает магнитный поток под одним краем полюса и уменьшает под другим. В ненасыщенной машине результирующий поток полюсов остается неизменным. Однако при насыщении увеличение магнитного потока под одним краем полюса меньше уменьшения магнитного потока под другим краем.

Результирующий магнитный поток насыщенной машины под действием поперечной реакции якоря уменьшается. Это явление носит название размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

Количественная оценка размагничивающего действия тока якоря производится с помощью переходной характеристики $B_\delta = f(F_{\delta z})$ по рис. 28.10.

Пусть при холостом ходе магнитное состояние машины характеризуется магнитным потоком $\Phi_в$, индукцией в зазоре B'_δ и соответствующей МДС $F'_{\delta z}$.

Под нагрузкой кривая индукции магнитного поля в воздушном зазоре рассчитывается по суммарной МДС обмотки возбуждения и обмотки якоря и соответствует участку $3'-1'-4'$ переходной характеристики (см. рис. 28.10). Под краями полюсов индукция определяется по МДС $F'_{\delta z} \pm Ab_\delta/2$, где A — линейная нагрузка; $Ab_\delta/2$ — МДС обмотки якоря под краем полюса; площадь фигуры под кривой $3'-1'-4'$ пропорциональна потоку машины при нагрузке Ф, которому соответствует среднее значение индукции под полюсом

$$B_{\delta ср} = \Phi/(\alpha_\delta \tau l_\delta).$$

Индукция $B_{\delta ср}$ на переходной характеристике соответствует МДС $F_{\delta z}$, которая при холостом ходе создает тот же магнитный поток Ф, что и МДС $F_{\delta z}'$ при нагрузке.

МДС, на которую необходимо увеличить МДС обмотки возбуждения, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие поперечной реакции якоря $F_{qd} = F'_{\delta z} - F_{\delta z}$.

Приближенно (см. рис. 28.10)

$$F_{qd} \approx \frac{(B_{23}-B_{45})}{6(B_{23}+B_{45})} Ab_\delta.$$

Магнитный поток, который будет в машине после сброса нагрузки ($I_я = 0$) при сохранении той же МДС возбуждения $F_в$,

$$\Phi_в = \alpha_\delta B'_\delta l_\delta \tau.$$

Уменьшение магнитного потока под действием поперечной реакции якоря

$$\Delta\Phi = \Phi_в - \Phi.$$

При нагрузке МДС обмоток возбуждения

$$F_в = F_0 + F_{qd},$$

где F_0 — результирующая продольная МДС, соответствующая по характеристике намагничивания (см. рис. 28.11) потоку $\Phi = E/(c_e \Omega)$, где c_e см. § 28.5.

При номинальной нагрузке МДС обмоток возбуждения

$$F_{в.ном} = F_{0ном} + F_{qdном},$$

где $F_{0ном}$ — результирующая продольная МДС, соответствующая по характеристике намагничивания (см. рис. 28.11) потоку

$$\Phi_{ном} = E_{ном}/(c_e \Omega_{ном}),$$

где $E_{ном} = k_E U_{ном}$; $F_{qdном}$ определено для $\Phi_{ном}$ и $I_{я.ном}$.

С учетом влияния МДС последовательной обмотки МДС обмоток возбуждения при нагрузке

$$F_в \approx F_0 + F_{яd},$$

где $F_{яd} \approx F_{qd} \pm F_п$ — МДС обмотки возбуждения, компенсирующая действие МДС тока якоря; знак плюс соответствует размагничивающему, а знак минус — намагничивающему действию составляющей МДС тока якоря; $F_п = w_п I_п$ — МДС последовательной обмотки.

28.7. УРАВНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ

Уравнение напряжений якоря $U = E \pm I_{ном} r_я$, где знак плюс соответствует режиму двигателя; знак минус — режиму генератора; U — напряжение на щетках якоря ($E = E_{ном}$ при $I_я = I_{я.ном}$ и $U = U_{ном}$).

Определение напряжения U или МДС параллельной (или независимой) обмотки возбуждения $F_в$ производится при помощи характеристики холо-

стого хода, построенной для заданной частоты вращения Ω, и характеристического треугольника abc (см. рис. 28.12), катеты которого определяются формулами

$$bc \sim F_{ad} = F_{qd} \pm F_{п};$$

$$ac \sim I_{я} r_{я},$$

где знак плюс соответствует размагничивающему действию составляющих МДС от тока якоря, знак минус — иамагничивающему действию.

На рис. 28.12 построение выполнено для режима генератора при $bc \sim F_{qd} \pm F_{п} > 0$. Построение для режима двигателя аналогичио, но точка a лежит выше точки c. В случае намагничивающего действия МДС от тока якоря $bc \sim F_{ad} < 0$, которое может появиться при согласном включении последовательной обмотки, вершина b треугольника должна располагаться правее вершины c (см. рис. 28.21).

Электромагнитный вращающий момент

$$M = \left[\frac{PN}{2\pi a}\right] I_{я}\Phi = c_{M} I_{я}\Phi,$$

где $c_{M} = c_{e} = pN/2\pi a$ — постояиная, зависящая от обмоточиых даниых машины.

Вращающий момент, передаваемый валом,

$$M_{вал} = M \pm \frac{P_{м} + P_{м.д} + P_{т} + P_{щ.т}}{\Omega},$$

где $P_{м}$ — магнитные потери в якоре; $P_{м.д}$ — добавочные магнитные потери; $P_{т}$ — потери на трение о воздух и в подшипниках; $P_{щ.т}$ — потери иа трение в щетках; знак плюс — для геиератора, знак минус — для двигателя.

28.8. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Характеристики генераторов могут быть получены опытным путем или построеиы графически при помощи характеристики холостого хода и характеристического треугольника. Все характеристики определяются при постоянной частоте вращения Ω = = const.

Для нормальных машин постоянного тока с дополнительными полюсами и щетками, устаиовлеиными на геометрической нейтрали, горизонтальный катет характеристического треугольиика, который пропорциоиален току возбуждения, компеисирующему МДС якоря, определяют при $\Phi \approx \Phi_{ном}$ по формуле

$$bc \sim \frac{F_{ad}}{w_{в}} \approx \frac{F_{qd} \pm F_{п}}{w_{в}} \approx \frac{F_{qd\,ном} \pm F_{п.ном}}{w_{в}} \left(\frac{I_{я}}{I_{я.ном}}\right).$$

Характеристики генератора с независимым возбуждением. Схема включеиия обмоток геиератора показана иа рис. 28.13.

Построение:

а) внешией характеристики $U = f(I) = f(I_{я})$ производится (рис. 28.14) при постояиием токе возбуждения в независимой обмотке ($I_{в}$ = const) и n = const. Характеристики холостого хода представляются в виде зависимости ЭДС от тока возбуждения $I_{в}$, где $I_{в} = F_{в}/w_{в}$.

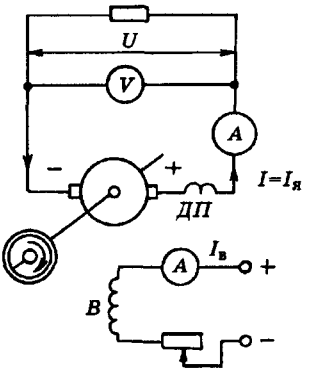


Рис. 28.13. Схема генератора с независимым возбуждением

ДП — обмотка возбуждения дополнительного полюса; *В* — независимая обмотка возбуждения

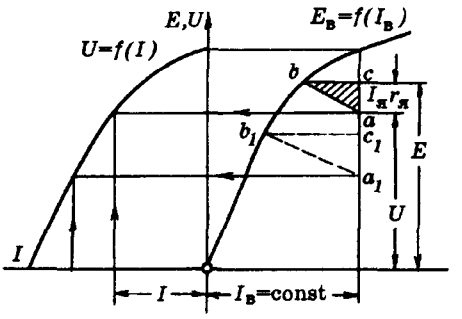


Рис. 28.14

Катеты характеристического треугольника определяются, как было пояснено выше, и могут считаться пропорциоиальными току якоря. При каждом выбранном токе якоря I треугольиик размещают таким образом, чтобы точка b лежала на характеристике холостого хода, а точка c — иа лиии $I_{в}$ = const. При этом расстояние от точки a до оси абсцисс пропорционально напряжению генератора U. Изменеиие напряжения генератора (при $I_{в}$ = = $I_{в.ном}$) при изменении тока якоря от I = 0 до I = = $I_{ном}$ иазывается номинальным изменением напряжеиия геиератора $\Delta U_{ном}$;

б) регулировочной характеристики $I_{в} = f(I) = f(I_{я})$ производится (рис. 28.15) при заданном постояиом значении напряжения генератора U = = const. При каждом выбраиом токе I треугольиик размещают таким образом, чтобы точка a лежала на лиии U = const, а точка b — иа характеристике холостого хода. При этом расстояние от точки a до оси ординат пропорциональио требуемому току возбуждения $I_{в}$;

в) нагрузочной характеристики $U = f(I_{в})$ производится (рис. 28.16) при заданном постояиом зиа-

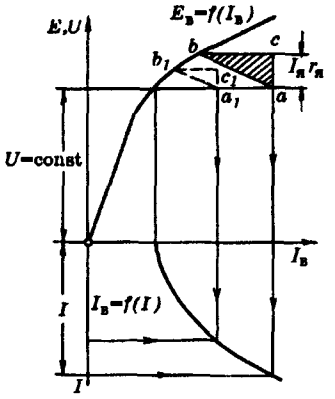


Рис. 28.15

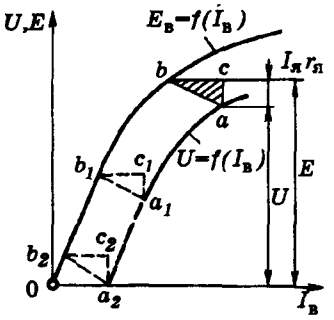


Рис. 28.16

чеиии тока генератора $I = I_я = \text{const}$, которому при иомииальном напряжении соответствуют определеииые размеры треугольника *abc*. В первом приближении можио считать, что размеры треугольника при измеиеиии напряжеиия и тока возбуждения сохраняются. Тогда, перемещая треугольиик таким образом, чтобы точка *b* оказывалась на характеристике холостого хода, можно иайти требуемую зависимость (расстояиие от точки *a* до оси абсцисс пропорциональио иапряжеиию *U*, а расстояние от точки *a* до оси ординат — току возбуждеиия $I_в$);

г) характеристики короткого замыкаиия $I_к = I_я = f(I_в)$ производится (рис. 28.17) при $U = 0$ и $n = \text{const}$ (точка *a* характеристического треугольиии-

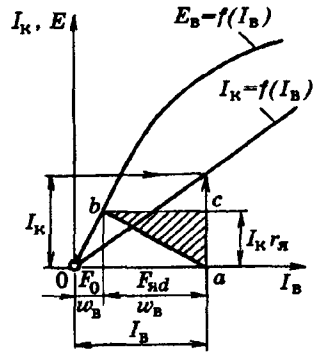


Рис. 28.17

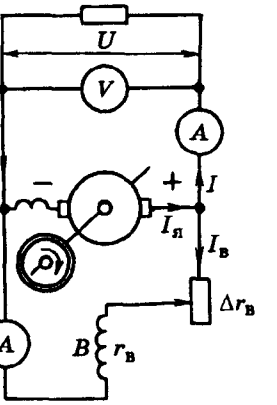


Рис. 28.18. Схема генератора параллельного возбуждения

ка располагается на оси абсцисс, точка *b* — на характеристике холостого хода). При определении размеров треугольника *abc* считается, что $F_{qd} = 0$ и учитывается только продольная МДС якоря (см. выше). Ток возбуждения при заданном токе короткого замыкания пропорционален расстоянию от точки *a* до оси ординат.

Характеристики генератора параллельного возбуждения. Схема включения обмоток геиератора показана на рис. 28.18. При построении необходимо учитывать, что напряжение на обмотке возбуждеиия $U_в = R_в I_в$ должно равняться иапряжению на якоре $U = E - r_я I_я$, причем $I_я = I + I_в \approx I$. В этих уравнеииях $R_в = r_в + \Delta r_в$; $r_в$ — сопротивление параллельиой обмотки; $\Delta r_в$ — сопротивление регулировочного реостата

Построение:

а) внешией характеристики $U = f(I)$ производится (рис. 28.19) при $R_в = \text{const}$. Напряжение на обмотке возбуждения изображается линией $U_в = R_в I_в$. Точка *a* треугольника *abc*, расстояние от которой до оси абсцисс пропорционально напряжению иа якоре *U*, должна лежать при всех значениях тока на линии $U_в$ ($U = U_в$);

б) регулировочной и нагрузочной характеристик генератора не отличается от построения соответствующих характеристик генератора с независимым возбуждением, если считать $I \approx I_я$.

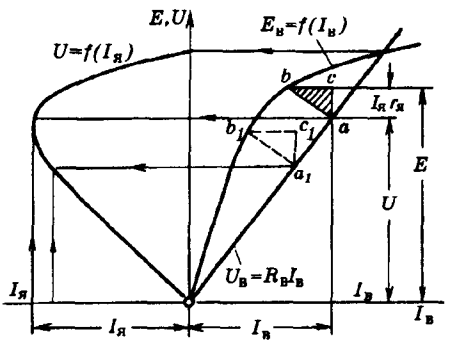


Рис. 28.19

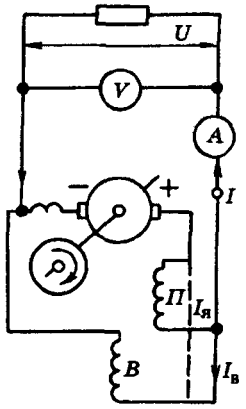


Рис. 28.20. Схема генератора параллельно-последовательного возбуждения

Характеристика короткого замыкания генератора снимается при независимом возбуждении.

Характеристики генератора смешанного (параллельно-последовательного) возбуждения. Генератор имеет параллельную *В* и последовательную *П* обмотки возбуждения, схема включеиия которых показана на рис. 28.20.

Последовательная обмотка может быть включена встречио или согласно с параллельной обмоткой возбуждения. Параллельная обмотка может быть присоединена или так, что $I_п = I_я = I - I_в$ или так, что $I_п = I_я - I_в = I$ (пунктирная линия на рис. 28.20).

Построение:

а) внешней характеристики [$U = f(I) = f(I_я)$, $R_в$ = const] показано для случая согласиого включения на рис. 28.21. Предполагается, что $F_п = I_я w_п > F_{qd}$. Поэтому $F_{яd} < 0$ и точка *b* характеристического треугольника лежит правее точки *c* ($|bc| = |F_{яd}| = |F_п - F_{qd}|$);

б) регулировочной и нагрузочиой характеристик, а также характеристики короткого замыкания происходит по аналогии с характеристиками генератора с параллельным возбуждеиием.

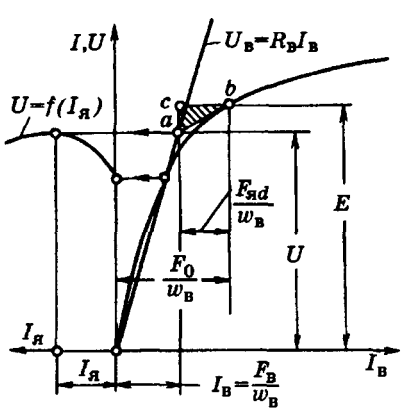


Рис. 28.21

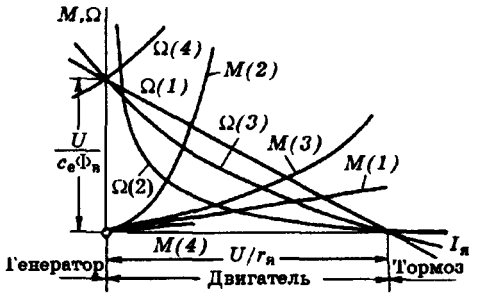


Рис. 28.22

28.9. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Угловая скорость двигателя постоянного тока

$$\Omega = \frac{U - I_я r_я}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{r_я M}{c_e c_M \Phi^2},$$

где $c_M = c_e = \frac{E}{\Phi \Omega} = \frac{pN}{2\pi a}$.

Электромехаиические и механические характеристики двигателей постоянного тока $\Omega = f(I_я)$ или $\Omega = f(M)$ при U = const, $I_в$ = const, $R_в$ = const показаиы на рис. 28.22. Цифровые обозначения кривых соответствуют различным системам возбуждения:

1 — двигатель с иезависимым или параллельиым возбуждением ($w_п = 0$);

2 — двигатель последовательиого возбуждеиия ($w_в = 0$);

3 — двигатель смешанного согласного возбуждеиия;

4 — двигатель смешанного встречного возбуждеиия.

28.10. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕРИЯХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В табл. 28.1 содержится обзор осиовных машин постоянного тока. Ежегодный выпуск машии постоянного тока значительно меиьше выпуска машин перемеииого тока. Основиыми сериями машии общепромышленного примеиения в настоящее время являются единые серии 2П и П2, которые охватывают машины всего необходимого народному хозяйству диапазона мощностей и частот вращения. Помимо этих серий выпускаются серии геиераторов и двигателей постояниого тока главным образом специализированного назначеиия: тяговые, крановометаллургические, судовые и др.

28.11. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЕДИНОЙ СЕРИИ 2П МОЩНОСТЬЮ ДО 200 кВт

Двигатели постоянного тока серии 2П предназначены для общего применения в системах совре-

Таблица 28.1. Серии машин постояниого тока

Тип	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$U_{ном}$, В	Краткая характеристика
		Двигатели		
2П	0,37 ÷ 200	600 ÷ 3000	110, 220, 340, 440	Выпускаются в различных исполнениях по способу защиты и охлаждения; общего назначения; заменяют двигатели серии П 1÷11-го габаритов
П2	315 ÷ 10 000	25 ÷ 500	440, 750, 930	Закрытые с принудительной вентиляцией; независимое возбуждение; заменяют двигатели серии П 18÷22-го габаритов
П (1÷11-го габаритов)	0,2 ÷ 200	600 ÷ 3000	110, 220, 440	Общепромышленного применения и специализированного назначения
П (12÷ 22-го габаритов)	100 ÷ 6300	100 ÷ 1500	220 ÷ 1000	То же
Д	2,5 ÷185 при ПВ = 100%	410 ÷ 1460	220, 440	Высокая кратность пусковых моментов; широкий диапазон регулирования частоты вращения; для привода металлургических, крановых и других механизмов
ПБВ	0,75 ÷ 5,5	1000	60 ÷ 110	Закрытые; возбуждение от постоянных магнитов; высокомоментные; для работы в автоматической системе станков с ЧПУ
ПГ, ПГТ ПС, ПСТ ПБС, ПБСТ	1,0 ÷ 0,9 0,12÷0,75 0,4÷11,3	3000 3000 3000	60 ÷ 220 110, 220 110, 220, 340, 440	Закрытые с естественным охлаждением (ПГ, ПГТ); защищенные с принудительной вентиляцией (ПС, ПСТ, ПБС, ПБСТ); реверсивные, исполнительные, общего назначения
ДПМ	2,8 ÷ 60 при ПВ = 25%	675 ÷ 1700	110, 220	Водозащищенные; с естественным охлаждением; широкий диапазон регулирования частоты вращения; для привода судовых механизмов
МП	1000 ÷ 6300	32/80 ÷ 63/80	440, 930	Закрытые с принудительной вентиляцией; для привода прокатных станов
МПС	45 630 11 500	50/100 63/80 750/1000	220 600 930	Специальные электродвигатели для металлургической промышлениостн
2МП	2000 ÷ 12 600	50/100÷300/500	930	Закрытые с принудительной вентиляцией; двухъякорные; для привода прокатных станов
МИ	0,1 ÷ 0,37	1000, 2000, 3000	60, 110	Закрытые (водозащищенные); для работы в схемах автоматики
МПБ	21 ÷600 в режиме двигателя 25 ÷ 800 в режиме генератора	1250÷3100 1500÷3200	220 ÷ 580 230÷700	Балансирные машины; для работы в качестве тормозного генератора или двигателя при испытании электрических машин и других механизмов
		Генераторы		
П(1÷11-го габаритов)	1,1 ÷1,90	970 ÷ 2850	115, 230, 460, 110/160, 220/320	Защищенные; смешанное возбуждение; со стабильным и регулируемым напряжением; общего назначения; для зарядки аккумуляторов
П(18÷ 22-го габаритов)	1000 ÷ 6300	375, 500, 750	630 ÷ 1000	Закрытые с принудительной вентиляцией; для автономного питания двигателей по схеме Г—Д

Окончание табл. 28.1

Тип	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мии	$U_{ном}$, В	Краткая характеристика
ГП2	5700, 4200	375	725, 950	Для работы в двух- и трехмашинных преобразовательных агрегатах
ГП	630 ÷ 9500	375 ÷ 1250	400 ÷ 930	Для питания двигателей главных приводов прокатиых станов

Примечание. Через косую лииию показаны пределы регулироваиия частоты вращения и напряжения.

менного регулируемого электропривода. Серия 2П охватывает двигатели в диапазоие мощностей 0,37÷200 кВт при высотах оси вращения 90÷315 мм.

Серия 2П разработана электротехнической промышленностью вместо устаревшей серии электродвигателей постояиного тока П 1÷11-го габаритов, по сравиению с которой имеет следующие преимущества:

значительно увеличена мощность в заданном габарите;

расширеи диапазон регулироваиия частоты вращения;

улучшены дииамические показатели;

снижен уровень вибраций и шума;

обеспечеиа устойчивая коммутация, включающая работу от тиристориых преобразователей;

практически удвоеи срок службы;

унифицироваиы установочиые и присоедииительные размеры в соответствии с рекомендациями МЭК.

Для замены двигателей серии П 12÷26-го габаритов разработана единая серия двигателей постоянного тока П2 с высотой оси вращения 355 мм и выше.

Двигатели серии 2П классифицируются по следующим признакам:

1) степень защиты от окружающей среды (табл. 28.2);

2) способ охлаждения (табл. 28.2);

3) частота вращения (двигатели с высотой оси вращения 90÷200 мм изготавливаются с частотой вращения 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мии, а с высотой оси вращения 225÷315 мм — 600, 750, 1000, 1500 об/мин);

4) номинальное напряжение обмотки якоря (110, 220, 340, 440 В);

5) напряжение независимого возбуждения (110, 220 В).

Структурное обозначение типа двигателя серии 2П: 2 — порядковый иомер серии; П — двигатель постоянного тока; третья буква — исполиеиие по способу защиты и охлаждеиия (табл. 28.2); двухили трехзначное число — высота оси вращения, мм; следующая за числом буква — условиая длина сердечника якоря (М — первая длина, L — вторая длина); Г — наличие буквы означает, что двигатель выполнен с тахогенератором; последние буква и цифра означают климатическое исполнеиие и категорию размещения. Пример: 2ПФ160LУ4 — двигатель постоянного тока защищеиного исполнеиия с независимой вентиляцией от постороннего веитилятора, с высотой оси вращения 160 мм, второй длины, без тахогенератора, климатического исполнения У, категории размещения 4.

Таблица 28.2. Степень защиты двигателей серии 2П в зависимости от высоты оси вращения и способа охлаждеиия

Высота оси вращеиия, мм	Способ охлаждения машины	Способ защиты от окружающей среды	Степеиь защиты	Обозначение исполиеиия
90 ÷ 315	С самовентиляцией	Защищенные	IP22	Н
132 ÷ 315	С независимой вентиляцией от постороние-го вентилятора	То же	IP22	Ф
90 ÷ 200	С естествен-ным охлаждением	Закрытые	IP44	Б
132 ÷ 200	С наружиым обдувом от постороннего веитилятора	То же	IP44	О

Все двигатели серии 2П выполняются с независимым возбуждением и имеют компенсационную обмотку, обеспечивающую высокие перегрузки и широкий диапазои регулирования частоты вращения.

На рис. 28.23 показана прииципиальная конструкция двигателя серии 2П (исполнение с тахогенератором).

Технические требования, предъявляемые к двигателям серии 2П, сформулированы в ГОСТ 20529-82.

В табл. 28.3 и 28.4 приведены технические данные двигателей серии 2П с высотой оси вращения 90 ÷200 мм. В табл. 28.5 дана зависимость мощности двигателей серии 2П с высотой оси вращения 225 ÷315 мм напряжением 220 В от частоты вращения и исполнения по способу охлаждения

28.12. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И КРАНОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ Д

Электродвигатели серии Д предназначены для работы в электроприводах металлургических, краиовых, экскаваторных и других механиизмов в условиях повышенной влажности, запыленности и вибраций. Электродвигатели серии Д удовлетворяют

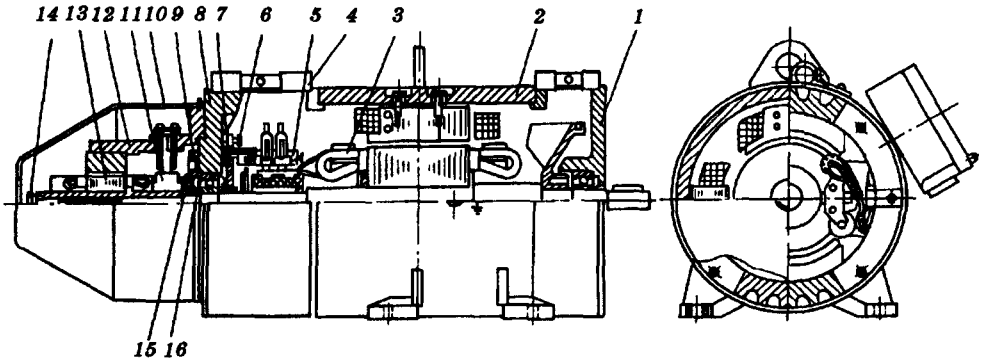


Рис. 28.23. Электродвигатель постоянного тока серии 2П с тахогенератором

1 — задний подшипниковый щит; *2* — станина; *3* — якорь; *4* — защитная лента; *5* — траверса, *6* — болт; *7* — лабиринт; *8* — передний подшипниковый щит; *9* — кольцо; *10* — колпак; *11* — коллектор тахогенератора; *12* — станина тахогенератора; *13* — якорь тахогенератора; *14* — болт; *15* — крышка; *16* — лабиринт

Таблица 28.3. Технические данные двигателей серии 2П с высотой оси вращения 90÷200 мм с частотой вращения 750÷1500 об/мин

Тип	$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В			
		110	220	340	440		110	220	340	440		110	220	340	440
	$n_{ном}$ = 750 об/мин					$n_{ном}$ = 1000 об/мин					$n_{ном}$ = 1500 об/мин				
2ПБ90М	0,13	3000	1500	900	—	0,18	4000	2000	1200	—	0,28	4000	3000	1800	—
2ПБ90L	0,18	3000	1500	900	—	0,25	4000	2000	1200	—	0,37	4000	3000	1800	—
2ПБ100М	0,26	3000	1500	900	—	0,37	4000	2000	1200	—	0,6	4000	3000	1800	—
2ПБ112М	0,34	3000	2500	2000	1500	0,45	4000	3500	2500	2000	0,75	4000	4000	3500	3000
2ПБ112L	0,5	3000	2500	2000	1500	0,63	4000	3500	2500	2000	1,0	4000	4000	3500	3000
2ПБ132М	1,1	3000	2500	2000	1500	1,6	4000	3500	2500	2000	2,4	4000	4000	3500	3000
2ПБ132L	1,6	3000	2500	2000	1500	1,9	4000	3000	2500	2000	3,2	4000	4000	3500	3000
2ПБ160М	2,1	3000	2500	2000	1500	2,5	4000	3000	2500	2000	4,2	4000	4000	3500	3000
2ПБ160L	2,5	3000	2500	2000	1500	3,2	4000	3000	2500	2000	5,3	4000	4000	3500	3000
2ПБ180М	3,4	3000	2500	2000	1500	4,5	3500	3000	2500	2000	7,1	3500	3500	3500	3000
2ПБ180L	4,2	3000	2500	2000	1500	5,6	3500	3000	2500	2000	8,5	3500	3500	3500	3000
2ПБ200L	6,0	3000	2500	2000	1500	8,0	—	3000	2500	2000	11,0	—	3500	3500	3000
2ПО132М	1,3	3000	2500	2000	1500	1,8	4000	3000	2500	2000	2,8	4000	4000	3500	3000
2ПО132L	1,6	3000	2500	2000	1500	2,2	4000	3000	2500	2000	3,4	4000	4000	3500	3000
2ПО160М	2,5	3000	2500	2000	1500	3,2	4000	3000	2500	2000	6,0	4000	4000	3500	3000
2ПО160L	3,2	3000	2500	2000	1500	4,0	4000	3000	2500	2000	7,1	4000	4000	3500	3000
2ПО180М	4,5	3000	2500	2000	1500	6,3	3500	3000	2500	2000	10,0	3500	3500	3500	3000
2ПО180L	5,2	3000	2500	2000	1500	7,5	3500	3000	2500	2000	—	—	—	—	—
2ПО200М	6,0	3000	2500	2000	1500	9,0	—	3000	2500	2000	14,0	—	3500	3500	3000
2ПО200L	7,1	3000	2500	2000	1500	11,0	—	3000	2500	2000	17,0	—	3500	3500	3000
2ПН90М	0,17	3000	1500	900	—	0,25	4000	2000	1200	—	0,37	4000	3000	1800	—
2ПН90L	0,22	3000	1500	900	—	0,34	4000	2000	1200	—	0,55	4000	3000	1800	—
2ПН100М	0,37	3000	1500	900	—	0,5	4000	2000	1200	—	0,75	4000	3000	1800	—
2ПН100L	0,42	3000	1500	900	—	—	—	—	—	—	1,1	4000	3000	1800	—
2ПН112М	0,6	3000	2500	2000	1500	0,85	4000	3500	2500	2000	1,5	4000	4000	3500	3000
2ПН112L	0,8	3000	2500	2000	1500	1,25	4000	3500	2500	2000	2,2	4000	4000	3500	3000
2ПН132М	1,6	3000	2500	2000	1500	2,5	4000	3500	2500	2000	4,0	4000	4000	3500	3000
2ПН132L	1,9	3000	2500	2000	1500	3,0	4000	3000	2500	2000	5,5	4000	4000	3500	3000
2ПН160М	3,0	3000	2500	2000	1500	4,5	4000	3000	2500	2000	7,5	4000	4000	3500	3000
2ПН160L	4,0	3000	2500	2000	1500	6,3	4000	3000	2500	2000	11,0	4000	4000	3500	3000

Окончание табл. 28.3

Тип	$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В			
		110	220	340	440		110	220	340	440		110	220	340	440
	$n_{ном}$ = 750 об/мин					$n_{ном}$ = 1000 об/мин					$n_{ном}$ = 1500 об/мин				
2ПН180М	5,6	3000	2500	2000	1500	8,0	3500	3000	2500	2000	15,0	3500	3500	3500	3000
2ПН180L	7,1	3000	2500	2000	1500	10,0	3500	3000	2500	2000	18,5	—	3500	3500	3000
2ПН200М	8,5	3000	2500	2000	1500	13,0	3500	3000	2500	2000	22,0	—	3500	3500	3000
2ПН200L	11,0	3000	2500	2000	1500	16,0	—	3000	2500	2000	30,0	—	3500	3500	3000
2ПФ132М	2,0	3000	2500	2000	1500	3,0	4000	3000	2500	2000	4,0	4000	4000	3500	3000
2ПФ132L	2,8	3000	2500	2000	1500	4,2	4000	3000	2500	2000	5,5	4000	4000	3500	3000
2ПФ160М	4,2	3000	2500	2000	1500	6,0	4000	3000	2500	2000	7,5	4000	4000	3500	3000
2ПФ160L	5,6	3000	2500	2000	1500	8,0	4000	3000	2500	2000	11,0	4000	4000	3500	3000
2ПФ180М	9,0	3000	2500	2000	1500	12,0	3500	3000	2500	2000	15,0	3500	3500	3500	3000
2ПФ180L	10,0	3000	2500	2000	1500	14,0	3500	3000	2500	2000	18,5	—	3500	3500	3000
2ПФ200М	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22,0	—	3500	3500	3000
2ПФ200L	15,0	3000	2500	2000	1500	20,0	—	3000	2500	2000	30,0	—	3500	3500	3000

Таблица 28.4. Технические данные двигателей серии 2П с высотой оси вращения 90÷200 мм с частотой вращения 2200÷3000 об/мин

Тип	$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин при напряжении, В				Момент инерции ротора J, кг·м^2	Масса, кг	Размеры по рис. 28.24	
		110	220	340	440		110	220	340	440			b_{11}, м	L_{30}, м
	$n_{ном}$ = 2200 об/мин					$n_{ном}$ = 3000 об/мин								
2ПБ90М	0,4	4000	4000	2700	—	0,55	4000	4000	3600	—	0,004	24	0,179	0,369
2ПБ90L	0,53	4000	4000	2700	—	0,75	4000	4000	3600	—	0,005	27	0,179	0,394
2ПБ100М	0,85	4000	4000	2700	—	1,2	4000	4000	3600	—	0,011	36	0,211	0,414
2ПБ112М	1,1	4000	4000	3500	3500	1,4	4000	4000	4000	4000	0,014	47	0,220	0,486
2ПБ112L	1,5	4000	4000	3500	3500	2,0	4000	4000	5000	4000	0,017	56	0,220	0,531
2ПБ132М	3,7	4000	4000	4000	4000	4,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86	0,256	0,618
2ПБ132L	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0468	96	0,256	0,662
2ПБ160М	6,0	4000	4000	3500	3000	7,1	4000	4000	4000	4000	0,0835	141	0,312	0,642
2ПБ160L	7,5	4000	4000	3500	3000	8,1	—	4000	4000	4000	0,104	159	0,312	0,692
2ПБ180М	9,5	3500	3500	3500	3000	12,0	—	3500	3500	3500	0,20	213	0,340	0,780
2ПБ180L	11,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,229	234	0,340	0,819
2ПБ200L	15,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,30	325	0,392	0,842
2ПО132М	4,5	4000	4000	4000	4000	5,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	100	0,256	0,881
2ПО132L	5,3	4000	4000	4000	4000	6,7	4000	4000	4000	4000	0,0468	110	0,256	0,925
2ПО160М	8,0	4000	4000	4000	4000	9,5	4000	4000	4000	4000	0,0835	151	0,312	0,915
2ПО160L	10,0	4000	4000	4000	4000	12,0	—	4000	4000	4000	0,104	169	0,312	0,965
2ПО180М	14,0	—	3500	3500	3500	17,0	—	3500	3500	3500	0,20	235	0,340	1,047
2ПО180L	16,0	—	3500	3500	3500	—	—	—	—	—	0,229	256	0,340	1,087
2ПО200М	20,0	—	3500	3500	3500	20,0	—	3500	3500	3500	0,25	312	0,392	1,057
2ПО200L	24,0	—	3500	3500	3500	28,0	—	—	3500	3500	0,30	355	0,392	1,117
2ПН90М	0,71	4000	4000	2700	—	1,0	4000	4000	3600	—	0,004	24	0,179	0,369
2ПН90L	0,9	4000	4000	2700	—	1,3	4000	4000	3600	—	0,005	27	0,179	0,394
2ПН100М	1,2	4000	4000	2700	—	—	—	—	—	—	0,011	36	0,211	0,414
2ПН100L	—	—	—	—	—	2,2	4000	4000	3600	—	0,012	39	0,211	0,434
2ПН112М	2,5	4000	4000	3500	3500	3,6	4000	4000	4000	4000	0,014	47	0,220	0,486
2ПН112L	3,4	4000	4000	3500	3500	5,3	4000	4000	4000	4000	0,017	56	0,220	0,531
2ПН132М	7,0	4000	4000	4000	4000	10,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	86	0,256	0,618
2ПН132L	8,5	4000	4000	4000	4000	14,0	4000	4000	4000	4000	0,468	96	0,256	0,663
2ПН160М	13,0	—	4000	4000	4000	18,0	—	4000	4000	4000	0,0835	141	0,312	0,642

Окончание табл. 28.4

Тип	$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				$P_{ном}$, кВт	n_{max}, об/мин, при напряжении, В				Момент инерции ротора J, кг·м^2	Масса, кг	Размеры по рис. 28.24	
		110	220	340	440		110	220	340	440			b_{11}, м	L_{30}, м
	$n_{ном}$ = 2200 об/мин					$n_{ном}$ = 3000 об/мин								
2ПН160L	16,0	—	4000	4000	4000	24,0	—	4000	4000	4000	0,104	159	0,312	0,694
2ПН180M	26,0	—	3500	3500	3500	37,0	—	3500	3500	3500	0,20	213	0,340	0,779
2ПН180L	30,0	—	3500	3500	3500	42,0	—	—	3500	3500	0,229	234	0,340	0,819
2ПН200M	36,0	—	3500	3500	3500	60,0	—	—	3500	3500	0,25	282	0,392	0,782
2ПН200L	53,0	—	—	3500	3500	75,0	—	—	3500	3500	0,30	325	0,392	0,842
2ПФ132M	6,0	4000	4000	4000	4000	7,5	4000	4000	4000	4000	0,0375	98	0,256	0,917
2ПФ132L	7,5	4000	4000	4000	4000	11.0	4000	4000	4000	4000	0,0468	108	0,256	0,962
2ПФ160M	13,5	—	4000	4000	4000	16,0	—	4000	4000	4000	0,0835	153	0,312	0,952
2ПФ160L	16,0	—	4000	4000	4000	18,5	—	4000	4000	4000	0,104	171	0,312	1,002
2ПФ180M	—	—	—	—	—	26,0	—	3500	3500	3500	0,2	236	0,340	1,079
2ПФ180L	25,0	—	3500	3500	3500	32,0	—	—	3500	3500	0,229	257	0,340	1,119
2ПФ200M	30,0	—	3500	3500	3500	40,0	—	—	3500	3500	0,25	303	0,392	1,103
2ПФ200L	42,0	—	3500	3500	3500	55,0	—	—	—	3500	0,30	346	0,392	1,163

Таблица 28.5. Мощность двигателей серии 2П с высотой оси вращения 225÷315 мм в зависимости от частоты вращения и исполнения (U = 220 В)

Высота оси вращения, мм	Условная длина	$P_{ном}$, кВт, при частоте вращения, об/мин			
		1500	1000	750	600
225	M	37	22	15	11
225	L	45	30	18,5	15
250	M	55	37	22	18,5
250	L	75	45	30	22
280	M	110	75	45	30
280	L	132	90	55	37
315	M	160	110	75	45
315	L	200	132	85	55

рекомендациям МЭК и по своим техническим показателям соответствуют лучшим зарубежным сериям.

По степени защиты двигатели выпускаются в двух исполнениях: закрытые IP21 и с принудительной вентиляцией IP20 (см. § 25.6). Класс изоляции Н (провод ПСДКТ), пропитка термореактивная компаундом "Монолит-2". Технические данные двигателей на напряжение 220 В в продолжительном (ПВ=100%), в часовом и в повторно-кратковременном (ПВ=40%) режимах приведены в табл. 28.6. Примерно такие же данные имеют двигатели на напряжение 440 В.

Двигатели допускают регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Максимальная частота вращения примерно в 3 раза превышает номинальную. Двигатели обладают высокими динамическими показателями (малые момент инерции и механические постоянные времени). Габаритные и установочные размеры двигателей, показанные на рис. 28.24, приведены в табл. 28.7.

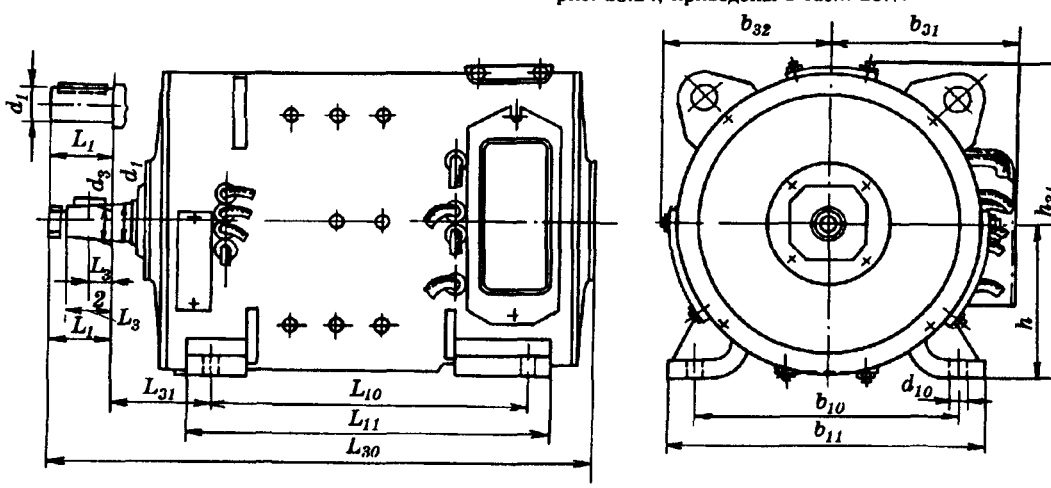


Рис. 28.24. Электродвигатель постоянного тока серии Д (габаритные и устаиовочные размеры)

Таблица 28.6. Номинальная мощность и частота вращения металлургических и крановых электродвигателей постоянного тока серии Д на напряжение 220 В

Тип	Закрытые в часовом режиме и продуваемые в длительном режиме (ПВ = 100%)					Закрытые в повторно-кратковременном режиме (ПВ = 40%)								Максимально допустимая частота вращения, об/мин
	Мощность $P_{ном}$, кВт	Частота вращения n, об/мин, при возбуждении				Мощность P, кВт, и частота вращения n, об/мин, при возбуждении								
		последовательном	смешанном	параллельном со стабилизирующей обмоткой	параллельном	последовательном		смешанном		параллельном со стабилизирующей обмоткой		параллельном		
						P	n	P	n	P	n	P	n	
Тихоходные														
Д-12	2,5	1100	1175	1140	1180	2,4	1150	2,4	1230	2,4	1200	2,4	1230	3600
Д-21	4,5	900	1050	1000	1030	3,6	1040	3,6	1140	3,6	1060	3,6	1080	3600
Д-22	6,0	850	1050	1070	1100	4,8	970	4,8	1120	4,8	1120	4,8	1150	3600
Д-31	8,0	800	870	820	840	6,8	900	6,8	910	6,8	850	6,8	880	3600
Д-32	12,0	675	780	740	770	9,5	760	9,5	840	9,5	770	9,5	800	3300
Д-41	16,0	650	700	670	690	13,0	730	13,0	740	13,0	700	13,0	720	3000
Д-806	22,0	575	650	635	650	19,0	640	17,0	730	16,0	700	16,0	710	2600
Д-808	37,0	525	575	565	575	24,0	615	24,0	650	22,0	620	22,0	630	2300
Д-810	55,0	500	—	540	550	35,0	610	—	—	29,0	590	29,0	600	2200
Д-812	75,0	475	—	500	515	47,0	560	—	—	38,0	555	38,0	565	1900
Д-814	110,0	460	—	490	500	66,0	565	—	—	55,0	550	55,0	560	1700
Д-816	150,0	450	—	470	480	85,0	540	—	—	70,0	525	70,0	535	1600
Д—818	185,0	410	—	440	450	100,0	515	—	—	83,0	460	83,0	470	1500
Быстроходные														
Д-21	5,5	1200	1450	1400	1440	4,4	1340	4,4	1550	4,4	1460	4,4	1500	3600
Д-22	8,0	1200	1390	1450	1510	6,5	1300	6,5	1475	6,5	1510	6,5	1570	3600
Д-31	12,0	1100	1280	1310	1360	9,5	1190	9,5	1360	9,5	1360	9,5	1420	3600
Д-32	18,0	960	1100	1140	1190	13,5	1100	13,0	1200	13,0	1190	13,0	1240	3300
Д-41	24,0	970	1120	1060	1100	18,0	1060	18,0	1160	17,5	1120	17,5	1160	3000
Д-806	32,0	900	980	980	1000	23,0	1010	23,0	1060	21,0	1050	21,0	1060	2600
Д-808	47,0	720	800	770	800	30,0	850	30,0	860	26,0	810	26,0	825	2300

Примечание. Данные часового и продолжительного режимов считаются номинальными

Таблица 28.7. Основные размеры и масса электродвигателей постоянного тока серии Д

Тип	b_{10}	b_{11}	b_{31}	b_{32}	d_1	d_3	d_{10}	L_1	L_3	L_{10}	L_{11}	L_{30}	L_{31}	h	h_{31}	Масса, кг	J, кг·м^2
Д-12	280	330	185	160	28	—	19	60	—	220	280	561	115,0	160	323	130	0,2
Д-21	300	350	215	185	35	—	19	80	—	194	244	665	170,5	180	373	200	0,5
Д-22	300	350	215	185	35	—	19	80	—	239	289	710	170,5	180	373	225	0,62
Д-31	390	460	250	225	50	—	26	110	—	250	310	752	173,0	225	453	310	1,2
Д-32	390	460	250	225	50	—	26	110	—	320	380	822	173,0	225	453	365	1,7
Д-41	430	530	305	255	65	61,5	32	105	70	299	379	910	209,0	250	508	540	3,2
Д-806	420	508	305	255	65	61,5	32	105	70	533	613	930	165,0	250	508	635	4,0
Д-808	476	578	335	285	80	75,5	32	130	90	628	710	1047	159,0	280	562	885	8,0
Д-810	520	623	480	320	90	85,5	32	130	90	660	780	1114	178,0	315	635	1250	14,5
Д-812	570	690	510	350	100	94	35	165	120	724	884	1220	172,0	340	690	1170	28,0
Д-814	636	762	545	385	120	114	42	165	120	813	943	1362	200,0	375	762	2240	41,0
Д-816	686	826	570	410	130	122,5	42	200	150	890	1050	1502	212,0	400	810	2860	65,0
Д-818	760	915	620	460	140	132,5	48	200	150	990	1130	1579	201,0	450	910	3745	110,0

Раздел 29

ВЕНТИЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

А. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

29.1. Осиовиые типы вентильных двигателей 240
29.2. Устройство и принцип работы веитильных двигателей 241
29.3. Характеристики вентильных двигателей 242
29.4. Вентильные двигатели серии ВД мощностью 30÷132 кВт 244
29.5. Вентильные двигатели серии ВД мощиостью 200÷3150 кВт 245
29.6. Вентильные двигатели серии ПЧВС . . 246
29.7. Вентильиые двигатели для промышлениых роботов и манипуляторов . . . 247
Особеиности двигателей для привода роботов и манипуляторов (247). Вентильные двигатели серии ДВУ с ферритовыми магнитами (248). Вентильные двигатели серии 2ДВУ с возбуждением от редкоземельных магнитов (250). Вентильные двигатели серии 2ДВМ с возбуждением от редкоземельиых магнитов (251). Бесконтактиые моментные электродвигатели серий ДБМ и ДБМ-Р18 (253). Электромеханический следящий привод робота с релейным законом управления типа ДБ60-10-4 (255). Электромеханический привод транспортных роботов типа ДБ60-90-6 (258). Вентильные двигатели электромеханических модулей (259). Тиристорный электропривод ЭТС1 (260).

Б. ВЕНТИЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

29.8. Основные типы вентильных генераторов 261
29.9. Устройство и принцип работы бесконтактных вентильных генераторов . . . 262
29.10. Автомобильные, мотоциклетные и тракторные вентильные генераторы 264
Список литературы 267

А. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

29.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Электрические машины, функционально объединенные с управляемыми полупроводниковыми коммутаторами, получили название вентильных машин.

Электромеханическая часть такого устройства, т.е. собственно электрическая машина, как правило, аналогична известным конструктивным модификациям синхронных машин с использованием скользящего токосъема или в бесконтактном исполиеиии. Преимущественное применение в настоящее время бескоитактные вентильные машииы находят в качестве двигателей и генераторов.

Вентильиые двигатели (ВД) имеют регулируемую в широких пределах частоту вращения ротора, обладают высокими пусковыми момеитами и хорошими эиергетическими показателями. По своим характеристикам они достаточно близки к коллекторным машинам. Вместе с тем отсутствие коллекторно-щеточиого узла существенно повышает иадежность и долговечность веитильных машии, снимает ограиичеиия, определяемые коммутацией, особенио при высоких скоростях и перегрузках. Эти преимущества вентильных машин особеино заметиы при их использоваиии во взрывоопасной и агрессивной средах при повышениой температуре.

В системах звукозаписи, медицинской аппаратуре, робототехнике, а также в ряде случаев для электроприводов мощностью до нескольких десятков киловатт применяют двигатели с постоянными магнитами различной конструкции, гистерезисные, реактивные и индукторные. Разрабатываются и применяются также ВД для электромобилей и других транспортных средств. Применение ВД повышенного иапряжения с магнитами на основе редкоземельных материалов позволяет заменить в самолетных энергосистемах гидро- и пневмоприводы на электроприводы меньшей массы и повышенной надежности. Вентильные двигатели мощностью до 1 кВт начинают постепенно применяться и для бытовой техиики. Предполагается, что уже в ближайшее время они станут основой электропривода стиральных машин, пылесосов, электроинструмента и т. д., обеспечив качественио иовый технический уровень бытового электрооборудования.

Для установок средней мощности применяются двигатели с электромагнитным возбуждением в обычном или обращенном исполнении, с когтеобразными полюсами или бесконтактные. Выпускаются веитильные двигатели серии ВД мощностью 30÷132 кВт для приводов главного движения металлорежущих станков с ЧПУ. Тиристорные электроприводы с вентильными двигателями серии ПЧВС обеспечивают пуск и регулирование частоты вращеиия мощных высоковольтных синхронных двигателей. Вентильиые двигатели применяются также в качестве пусковых двигателей, например для разгона гидрогенераторов.

Вентильные двигатели большой мощности (более 100 кВт) нашли примеиенне там, где ранее использовались нерегулируемые асинхронные или синхронные двигатели. Выпускаются ВД мощностью

1600 кВт с регулированием частоты вращения для привода компрессоров холодильных машин и насосов циркуляционных систем. Вентильные двигатели серии ВД мощностью 200÷3150 кВт с низкой частотой вращения применяются в регулируемых безредукторных электроприводах химического и мельничного оборудования, шахтного подъема, буровых установок, насосов, вентиляторов.

Мощность промышленных приводов с вентильными двигателями достигает в настоящее время 20 МВт, а в специальных случаях даже 100 МВт. Благодаря быстрому развитию полупроводниковой силовой техники верхний предел мощности для вентильных двигателей определяется уже скорее целью их использования, чем возможностями преобразователей и электрических машин.

Диапазон скоростей мощных ВД простирается примерно от 10 об/мин для низкоскоростных приводов до 1500÷3000 для средиескоростных и 6000÷18 000 об/мин для высокоскоростных приводов.

Применение ВД большой мощности инициировано также и тем обстоятельством, что двигатели постоянного тока имеют принципиальные ограничения по напряжению, частоте вращения и предельной мощности (примерно 1000 В, 1000 об/мин и 1000 кВт соответственно, причем увеличение любого из указанных показателей означает уменьшение двух других).

Удельные массы ВД заметно превышают удельные массы обычных электрических машин. Например, при мощностях 200÷300 кВт и частоте вращения около 1000 об/мин их удельная масса составляет 6÷8 кг/кВт вместе с электронным преобразователем. Однако постоянный прогресс в электронной и микропроцессорной технике приводит к неуклонному и весьма заметному уменьшению масс и габаритов полупроводниковых преобразователей и снижению их стоимости.

29.2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Вентильные двигатели предназначены для работы от сети постоянного или переменного тока.

Наибольшее применение нашли ВД с трехфазной обмоткой якоря. На рис. 29.1 показана принципиальная схема трехфазного синхронного ВД, получающего питание от сети переменного тока через промежуточное звено постоянного тока — управляемый тиристорный выпрямитель *В*. Ротор ВД двухполюсный с постоянными магнитами или электромагнитной системой возбуждения. На роторе закреплен датчик положения ротора *ДПР*, который через систему управления *СУ* обеспечивает управление инвертором *И*. Дроссель с индуктивностью $L_д$ поддерживает неизменным значение первичного тока I_d.

Использование датчика положения ротора является особенностью вентильного двигателя, так как сигналы на переключение вентилей инвертора поступают от системы управления в зависимости от положения ротора, благодаря чему может изменяться частота тока в обмотке якоря. Если бы инвертор был независимым и частота инвертируемого тока

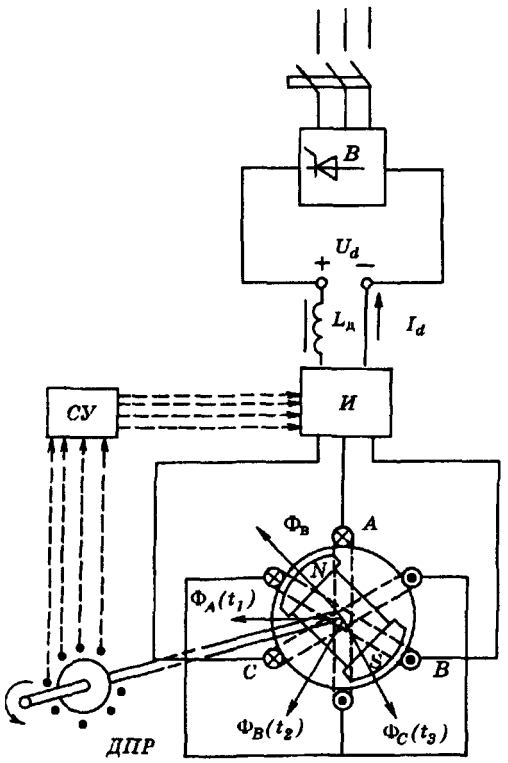


Рис. 29.1. Схема бесконтактного вентильного двигателя

поддерживалась неизменной, то рассматриваемая электромеханическая система инвертор — электрическая машина являлась бы обычным синхронным двигателем без регулирования частоты вращения.

Промежуточное звено постоянного тока разделяет частоты сети переменного тока и выхода инвертора, поэтому частота вращения двигателя не ограничивается частотой сети.

Для ВД небольшой мощности инвертор может быть создан на полностью управляемых элементах (транзисторах, двухоперационных тиристорах), а для ВД средней и большой мощности — на неполностью управляемых элементах (тиристорах, семисторах), а также на полностью управляемых тиристорах (GTO_s — gate turn off thyristors).

В последние годы бурно развивается также класс биполярных транзисторов с изолированным затвором $JGBT_s$, предельные параметры которых в настоящее время достигают по току 2400 А, по напряжению 3600 В.

Сравнение некоторых управляемых элементов (ключей) дано в табл. 29.1. Приведенные в этой таблице данные отражают не все типы ключей.

При вращении ротора *ДПР* через систему управления включает вентили инвертора и тем самым переключает токи в фазах обмотки якоря. На рис. 29.1 показаны соответствующие положения магнитного потока якоря Φ_A, Φ_B, Φ_C для трех моментов времени t_1, t_2, t_3. Ротор стремится повернуться так, чтобы его магнитный поток возбуждения $\Phi_в$ совпал с потоком обмотки фазы якоря. Когда оси потоков

Таблица 29.1. Сравнительные данные управляемых ключей

Тип ключа	Уровень мощности	Скорость переключения
BJT/MD (биполярный транзистор, монолитный Дарлингтон)	Средний	Средняя
MOSFFT (полевой транзистор)	Низкий	Высокая
GTO (запираемый тиристор)	Высокий	Низкая
IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором)	Средний	Средняя

ротора и фазы якоря сближаются, *ДПР* дает сигнал на включение тока в следующей фазе, что вызывает дальнейший поворот ротора и т. д.

Обычно на роторе ВД имеются хорошо проводящие контуры (демпферная обмотка, массивные полюсные наконечники), которые ослабляют изменение магнитного потока в роторе. Поэтому для ВД средней и большой мощности можно считать, что поток якоря вращается равномерно со средней частотой вращения ротора, т. е. в МДС якоря превалирует первая гармоника, создающая вращающееся поле, а высшие пространственные гармоники МДС подавляются демпфирирующими контурами.

Вращение ротора, в свою очередь, приводит к созданию в фазах обмотки якоря ЭДС, пропорциональной частоте вращения ротора и потоку $\Phi_в$. Эта ЭДС уравновешивает приложенное к обмотке якоря напряжение. Поэтому регулирование частоты вращения ВД может достигаться изменением напряжения питания, с повышением которого частота вращения увеличивается. Другой способ регулирования частоты вращения основан на изменении $\Phi_в$, если ВД выполнен с обмоткой возбуждения. Если уменьшать $\Phi_в$ при постоянном напряжении питания, то для поддержания требуемой ЭДС вращение ротора ускорится. Существует и третий, специфический для вентильных двигателей, способ регулирования частоты вращения — изменение угла включения тока в фазах обмотки якоря: с увеличением этого угла по отношению к положению ротора частота вращения обычно увеличивается.

При заданной частоте вращения процессы, происходящие в ВД, могут анализироваться на базе теории синхронных машин. В то же время в ряде случаев ВД можно исследовать по средним параметрам с использованием теории машин постоянного тока.

Инвертирование в ВД осуществляется с помощью известных инверторных схем, подробно рассмотренных в технической литературе [29.6].

Датчики положения ротора ВД представляют собой встроенный в двигатель узел, состоящий из чувствительных элементов, закрепленных на статоре, и сигнальных элементов, закрепленных на роторе. В относительно мощных ВД наибольшее распространение получили индукционные датчики. Существуют *ДПР* на основе магнитодиодов и фотоэлементов. Если требуется глубокое регулирование частоты вращения двигателя, применяют *ДПР* типа бесконтактного сельсина. Такой *ДПР* фиксирует и частоту вращения двигателя.

Кроме *ДПР* в вентильных двигателях могут использоваться: датчики, фиксирующие положение амплитуды полного магнитного потока (на базе датчиков Холла или индукционных элементов с насыщающейся магнитной цепью при прохождении мимо датчиков амплитуды потока двигателя); датчики фазы напряжения якорной обмотки; датчики длительности периода коммутации вентилей (угла γ); датчики, сигналы которых пропорциональны напряжению и току двигателя (датчики нагрузки) [29.7, 29.8].

Одним из требований, предъявляемых к ВД средней и большой мощности, является минимальная длительность процесса коммутации инвертора. В целях снижения сверхпереходных индуктивных сопротивлений x''_d и x''_q двигатели средней и большой мощности снабжают медной демпферной обмоткой сечением не менее 20% сечения проводников якорной обмотки. В некоторых случаях для снижения x''_d и x''_q используется якорь с беспазовой укладкой обмотки.

29.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рабочие характеристики ВД в основном определяются режимом работы инвертора, временные диаграммы напряжений и токов которого показаны на рис. 29.2. Должны быть постоянными:

1) угол β опережения относительно точек пересечения кривых фазных напряжений;

2) угол $\beta_0 = \beta + \theta$ опережения относительно точек пересечения кривых фазных ЭДС холостого хода, где θ — угол нагрузки синхронного двигателя;

3) средний угол $\gamma_{ср}$ коммутации;

4) расчетная мощность.

В первом случае используются датчики положения амплитуды полного потока ВД, определяющего фазу напряжения U.

Во втором случае применяются датчики положения ротора, поскольку фаза ЭДС холостого хода зависит только от положения полюсов (оси d).

В третьем режиме кроме датчика положения амплитуды потока используется датчик угла коммутации.

В четвертом режиме P = const, применяемом для транспортных установок, система управления поддерживает постоянным угол β, изменяет напряжение на двигателе прямо пропорционально, а ток возбуждения $I_в$ обратно пропорционально корню квадратному из частоты вращения. Характеристики ВД для этого режима показаны на рис. 29.3, *а*. В общем случае механическая характеристика ВД может варьироваться в широких пределах путем задания законов управления для углов, напряжений и тока возбуждения. Она может быть астатической, иметь положительный и отрицательный коэффициенты статизма, экстремумы и т. п. в зависимости от конкретных требований системы управления. Бесконтактные синхронные двигатели с постоянными магнитами позволяют получать высокую перегрузочную способность в рабочих и переходных режимах,

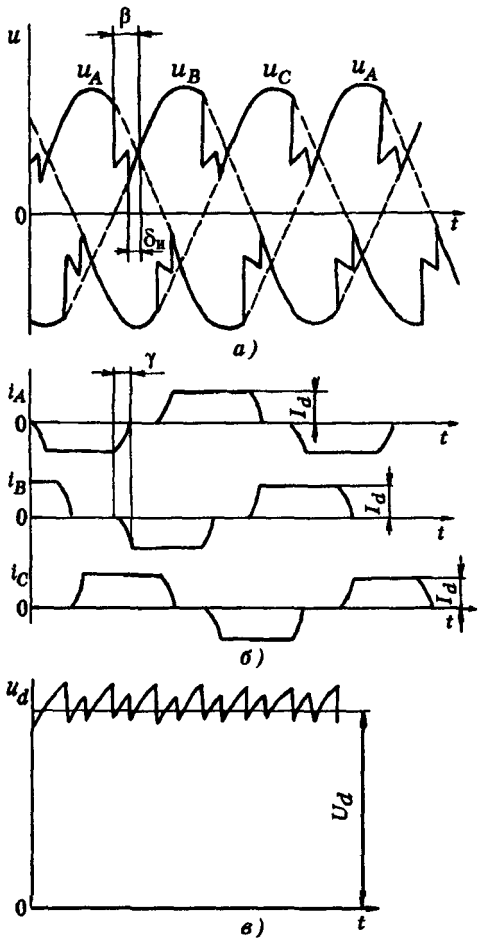


Рис. 29.2. Временные диаграммы напряжений (*а*, *в*) и токов (*б*) трехфазного мостового инвертора

сохраняя при этом линейность характеристики момент — ток.

На рис. 29.3, *б* приведены механические характеристики неявнополюсиого ВД при токе возбуждения $I_в$ = const, β_0 = const. Этот режим по сравнению с другими способами регулироваиия позволяет уменьшить воздушный зазор в двигателе, что обеспечивает хорошие массогабаритные показатели. При β_0 = const зиачение частоты вращеиия ротора $\omega_р$ падает с ростом момента тем сильнее, чем больше $x_к$ (индуктивное сопротивление фазы во время коммутации, близкое по зиачеиию к x''_d синхронного двигателя). Увеличеиие момента, как правило, сопровождается ростом тока двигателя и соответственно увеличеиием угла γ. Так как β_0 = const, рост γ приводит к снижеиию угла запаса инвертора $\delta_и$. При некотором моменте иивертор работает иа пределе устойчивости. Соответствующие ему граиицы обозначены на рис. 29.3, *б* штрихпунктирными линиями.

Если система управлеиия поддерживает иеизменным угол запаса $\delta_и = \beta - \gamma$, то обеспечивается оптимальный режим по надежиости иивертирования. При этом механические характеристики приобретают нарастающий характер (пуиктирные линии иа рис. 29.3, *б*). Работа в этом режиме может быть неустойчивой.

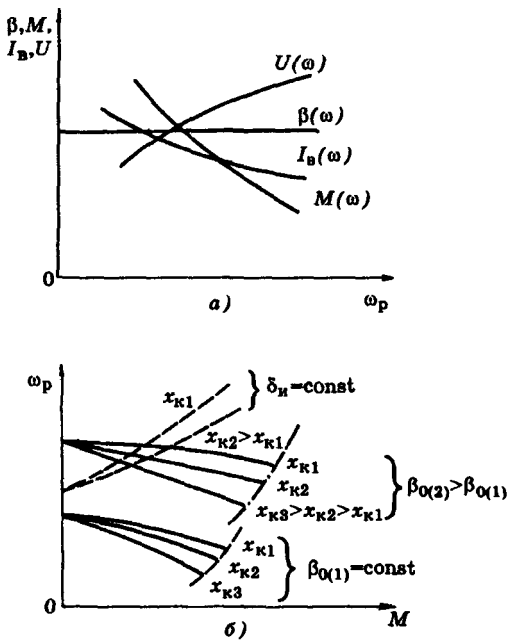


Рис. 29.3. Зависимости показателей ВД от частоты вращения в режиме постоянной мощности (*а*) и механические характеристики (*б*)

Зависимости между основиыми электромагнитными и механическими показателями ВД могут быть представлены формулами, аналогичными формулам для коллекторных машин постояниого тока:

$$E_d = c_e k_и Φn; \quad (29.1)$$

$$U_d = E_d + I_d R_a; \quad (29.2)$$

$$n = (U_d - I_d R_a)/(c_e k_и Φ); \quad (29.3)$$

$$c_e = \pi pN k_o/(\sqrt{3} \cdot 60); \quad (29.4)$$

$$k_и = (3/\pi)\cos(\delta + 0{,}5\gamma) \cos 0{,}5\gamma; \quad (29.5)$$

$$M = c_M k_н Φ I_d; \quad (29.6)$$

$$c_M = pN/(2\sqrt{3}), \quad (29.7)$$

где R_a — сопротивление в цепи якоря ВД; E_d — среднее значение ЭДС двигателя; c_e — постоянная ЭДС двигателя; c_M — постояииая момеита двигателя; $k_и$ — коэффициеит иивертирования; k_o — обмоточный коэффициент; Ф — полиый максимальный поток двигателя; n — частота вращения; U_d — напряжение, приложеииое к двигателю; I_d — среднее зиачеиие потребляемого тока; N — число проводиików обмотки якоря; p — число пар полюсов.

Специфика ВД по сравнеиию с коллекториыми двигателями проявляется в появлении коэффициента инвертироваиия $k_и$ и использовании полиого по-

тока Ф с учетом реакции якоря, которая приводит к существенному размагничиванию машины Если реакция якоря проявляется слабо, то ВД по протекающим процессам ближе к коллекторному, чем к синхронному двигателю.

Для ВД зависимость частоты вращения n от нагрузки и потребляемого тока I_d носит неоднозначный характер. Если мощность двигателя мала, размагничивающая реакция якоря проявляется незначительно и сопротивление R_a существенно, то при увеличении I_d главную роль играет уменьшение числителя в формуле (29 3), и n падает, как в обычном коллекторном двигателе. При относительно большой мощности ВД, когда сопротивление R_a мало, а реакция якоря, вызывающая снижение потока Ф, значительна, увеличение I_d вызывает снижение знаменателя в (29 3) и n возрастает. Очевидно, что такой режим ВД обладает пониженной устойчивостью.

Системы управления ВД предусматривают их защиту от обрыва фазы, перегрузки, превышения максимальной частоты вращения и обрыва обратной связи по скорости, короткого замыкания на входе в двигатель, от перенапряжений и снижения напряжения на выходе выпрямителя, от обрыва сигнала датчика положения, а также сигнализацию наличия питания, управляющих сигналов и т д

29.4. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ ВД МОЩНОСТЬЮ 30 ÷132 кВт

Вентильные двигатели этой серии предназначены для приводов главного движения металлорежущих станков с ЧПУ. Они выполняются с высотами оси вращения 225÷315 мм

Технические данные ВД основного исполнения с частотой вращения 1000 об/мин, а также модификаций с частотой вращения 500, 750, 1500 об/мин приведены в табл 29.2.

Электропривод получает питание от трехфазной сети напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Номинальное напряжение на якорной обмотке ВД 300 В Напряжение обмотки независимого возбуждения 220 В. Двигатели допускают двойную перегрузку по току в течение 10 с при номинальной частоте вращения и перегрузку $1{,}3I_{ном}$ при максимальной частоте вращения при сохранении постоянной мощности. Коэффициент мощности всех типоисполнений серии ВД равен 0,82

Диапазон регулирования частоты вращения 1 1000, в том числе 1·4 вверх от номинальной

Электрическая схема ВД представлена на рис 29 4 Она включает в себя управляемый выпрямительно-инверторный блок (преобразователь частоты *ПЧ*), питающий электромеханический преобразователь *ЭМП* (собственно двигатель), датчик положения

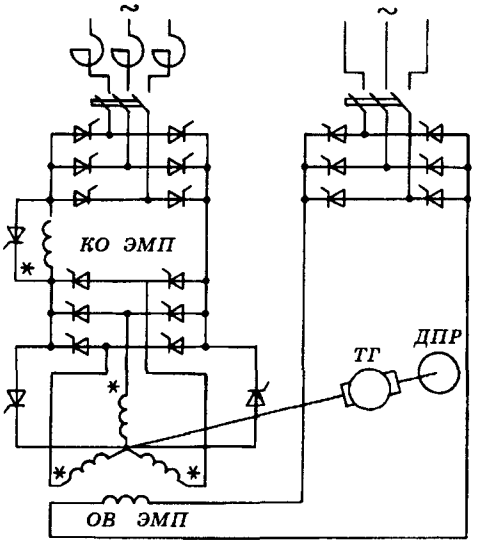


Рис. 29.4. Схема соединений силовых цепей ПЧ двигателей серии ВД

Таблица 29.2. Технические данные вентильных двигателей серии ВД мощностью 30 −132 кВт

Тип двигателя	Тип *ПЧ*	Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Ток в звене постоянного тока, А	Ток фазы, А	Кратность максимальной частоты вращения	КПД, %
ВД225ГУХЛ4	ЭТУ7801-39	15	500	50	39	4	78,9
ВД250ГУХЛ4	ЭТУ7801-39	22,4		76	59,4	4	80,2
ВД280ГУХЛ4	ЭТУ7801-41	45		146	115	3,5	81,8
ВД315ГУХЛ4	ЭТУ7801-41	67		218	170	3,5	84
ВД225ГУХЛ4	ЭТУ7801-39	22,4	750	75	58,5	4	82,3
ВД250ГУХЛ4	ЭТУ7801-41	33,5		114	89	4	83,6
ВД280ГУХЛ4	ЭТУ7801-44	67		220	173	3,5	85,4
ВД315ГУХЛ4	ЭТУ7801-44	100		330	258	3,5	87,2
ВД225ГУХЛ4	ЭТУ7801-39	30	1000	100	78	4	86,3
ВД250ГУХЛ4	ЭТУ7801-41	45	(основное	152	119	4	87,5
ВД280ГУХЛ4	ЭТУ7801-44	90	исполне-	295	230	3,5	89,4
ВД315ГУХЛ4	ЭТУ7801-47	132	ние)	435	340	3,5	90,5
ВД225ГУХЛ4	ЭТУ7801-41	45	1500	150	118	2,7	90
ВД250ГУХЛ4	ЭТУ7801-44	67		228	178	2,7	90,8
ВД280ГУХЛ4	ЭТУ7801-47	132		443	345	2,3	91,5
ВД315ГУХЛ4	ЭТУ7801-47	200		660	575	2,3	92,5

ротора *ДПР* и тахогенератор *ТГ*. Датчик положения ротора размещеи в том же узле, что и тахогенератор. Он представляет собой светофотодиодный узел и дает также информацию об угле поворота и частоте вращения (пути). Тахогенератор является серийной машиной типа ТМС-1.

Двигатель выполнеи в обращенном исполнении и конструктивно унифицирован с коллекторными двигателями постоянного тока серии 2П. Система возбуждения смешанная. Она состоит из обмотки независимого возбуждения *ОВ* и продольно компенсационной обмотки *КО*, включенной в звено постоянного тока *ПЧ*. Катушки обмоток независимого возбуждения и компеисационной расположены на разноимеиных полюсах. Все типоразмеры двигателя выполнены с четырехполюсным индуктором. В наконечниках полюсов размещена медная демпферная обмотка. Ротор имеет 36 пазов, скошениых на одно зубцовое деление. Обмотка якоря трехфазная, соединенная в звезду с нулевым проводом. Коицы фаз и нулевой провод выведеиы на четыре контактиых кольца, скользящий токосъем с которых обеспечивается с помощью металлосодержащих щеток, установлеииых в сдвоеииых щеткодержателях. Конструкция двигателя серии ВД показана на рис. 29.5.

Блок питаиия обмотки возбуждения двигателя конструктивно объединен с преобразователем частоты. Коммутация вентилей *ПЧ* при частотах вращения *ЭМП* от 0 до $0{,}1n_{ном}$ принудительная, а при частотах вращения выше $0{,}1n_{ном}$ естественная.

Структура условного обозначения вентильного двигателя: ВД 225 ГУХЛ4, где В — вентильный; Д — двигатель; 225 — высота оси вращения, мм; Г — наличие тахогенератора; УХЛ4 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Структура условного обозначения *ПЧ*: ЭТУ 7801-39, где Э — электропривод; Т — тиристориый; У — унифицированиый; 7 — с бесколлекторным двигателем; 8 — с двигателем низкого напряжения со статическим преобразователем; 39 — номинальный ток на выходе *ПЧ* равен 80 А.

29.5. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ ВД МОЩНОСТЬЮ 200÷3150 кВт

Двигатели предназначены для работы в регулируемых электроприводах химического и мельничного оборудования, шахтного подъема, буровых установок, насосов, вентиляторов. Они классифицируются по габаритам, полезной мощности и максимальной частоте вращеиия. Регулирование частоты вращения осуществляется в пределах $(0{,}1 \div 1)n_{max}$. В табл. 29.3 представлена шкала мощностей двигателей этой серии, а в табл. 29.4 даны КПД и коэф-

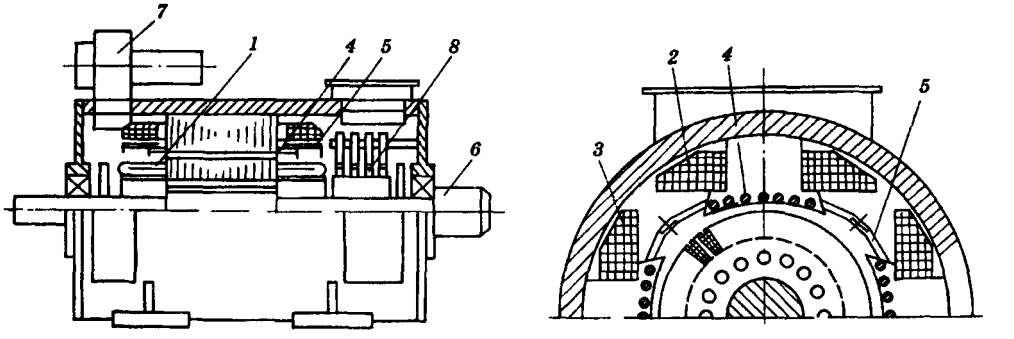


Рис. 29.5. Конструктивная схема двигателя серии ВД

1 — обмотка якоря; *2* — обмотка независимого возбуждения; *3* — продольная компенсационная обмотка; *4* — стержни демпферной обмотки; *5* — короткозамыкающие дуги; *6* — тахогенератор и *ДПР*; *7* — вентилятор; *8* — контактные кольца

Таблица 29.3. Шкала мощностей ннзкоскоростных двигателей серии ВД, кВт

Тип	Максимальная частота вращения, об/мин						
	100	200	300	400	500	750	1000
ВД800	—	—	—	200	250	400	500
	—	—	200	250	315	500	630
	—	200	250	315	400	630	800
ВД1000	—	250	315	400	500	800	1000
	—	315	400	500	630	1000	1250
	—	400	500	630	800	1250	1600
ВД1250	200	500	630	800	1000	1600	2000
	250	630	800	1000	1250	2000	2500
	315	800	1000	1250	2600	2500	3150
ВД1600	400	1000	1250	1600	2000	3150	—
	500	1250	1600	2000	2500	—	—
	630	1600	2000	2500	3150	—	—

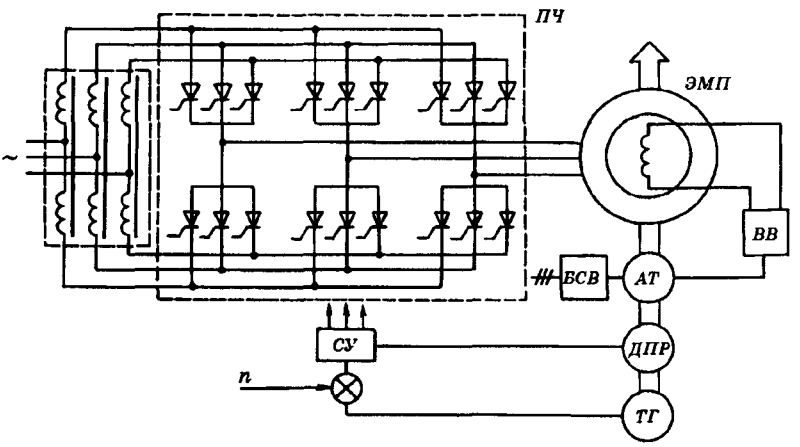


Рис. 29.6. Структурная схема низкоскоростного двигателя серии ВД

Таблица 29.4. КПД и коэффициент мощности при регулировании частоты вращения низкоскоростных двигателей серии ВД

Частота вращения, % n_{max}	КПД, % при:		cos φ
	постоянном моменте	вентиляторной нагрузке	
10	76	50	0,4
30	86	82	0,73
50	88	88	0,82
70	89	89	0,87
100	90	90	0,9

фициенты мощности при регулировании частоты вращения в указанном диапазоне.

Электрическая схема питания и управления низкоскоростным вентильным двигателем (рис. 29.6) включает в себя преобразователь частоты *ПЧ*, электромеханический преобразователь *ЭМП* (двигатель), датчик положения ротора *ДПР*, тахогенератор *ТГ*, тиристорный блок системы возбуждения *БСВ*, асинхроиный траисформатор *АТ*, вращающийся выпрямитель *ВВ*, систему управления *СУ*. Электромеханический преобразователь конструктивио унифицирован с серийным синхронным двигателем. Обмотка статора трехфазная. В наконечниках полюсов ротора размещена демпферная обмотка. Система возбуждеиия бесконтактиая. Трехфазиое иапряжение подается на тиристорный блок системы возбуждения *БСВ*, который позволяет получать на выходе регулируемое трехфазное напряжение, используемое для питания обмотки статора асиихрониого трансформатора *АТ*. Вторичное напряжеиие *АТ* выпрямляется вращающимся выпрямителем *ВВ* и подается на обмотку возбуждеиия двигателя.

Примеияется также система возбуждения ВД с использоваиием обычиого скользящего контакта. В этом случае с выхода *БСВ* на контактные кольца подается регулируемое выпрямленное иапряжение.

Преобразователь частоты включает в себя силовую часть и систему управлеиия *СУ*. Питаиие *ПЧ* осуществляется от промышленной трехфазной сети напряжением 660 В и частотой 50 Гц. Подключается *ПЧ* к сети через шестиобмоточный реактор. Синхронизация тнристоров *ПЧ* производится с помощью *ДПР*. Угол управления выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный момент на валу. Коммутация тока в тиристорах каждой группы происходит за счет напряжения сети. Коммутация тока при переключении групп имеет двоякий характер: при пуске и разгоне — сетевая, т. е. за счет напряжения сети, а при более высоких частотах вращения — смешанная, с использованием ЭДС двигателя.

29.6. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ ПЧВС

Двигатели этой серии используются для пуска и регулирования частоты вращения мощных синхронных двигателей высокого напряжения.

Тиристорный электропривод по схеме ПЧВС обеспечивает: пуск двигателя, работу в диапазоне частоты вращения $(0{,}06 \div 1)n_{ном}$, реверсирование, рекуперативное торможение, автоматическую синхронизацию двигателя с сетью, оптимизацию переходных процессов автоматическим ограничением тока на уровне $(1{,}5 \div 2)I_{ном}$. Технические данные ВД серии ПЧВС даны в табл. 29.5.

Электрическая схема электропривода серии ПЧВС показана на рис. 29.7. Электропривод состоит из серийно выпускаемого двигателя *М* (ЭМП), преобразователя частоты со звеном постоянного тока, тиристорного возбудителя, системы управления.

Преобразователь частоты состоит из выпрямителя и инвертора, выполиенных по трехфазной мостовой схеме. Каждое плечо состоит из ряда последовательно включенных тиристоров с устройствами, обеспечивающими равномерное деление напряжения между тиристорами, устройствами индикации исправности тиристоров и защиты при выходе из строя определенного числа полупроводниковых приборов. В силовой модуль входят также приборы контроля тока, напряжения и *RC*-цепи, ограничивающие перенапряжеиия при коммутации тока между тиристорами.

Таблица 29.5. Технические данные вентильных двигателей серии ПЧВС

Тип двигателя	Номинальные данные двигателя				Масса ПЧ, кг
	Мощность, кВт	Ток звена постоянного тока, А	Линейное напряжение, кВ	КПД, %	
ПЧВС-2/6-0004	2	250	6	98	4 180
ПЧВС-3,15/6-0004	3,15	400	6	98	4 180
ПЧВС-6,3/6-0004	6,3	800	6	97,9	6 990
ПЧВС-12,5/6-0004	12,5	2×800	6	98,2	13 980
ПЧВС-3,15/10-0004	3,15	250	10	98,5	4 180
ПЧВС-5/10-0004	5	400	10	98,2	4 180
ПЧВС-10/10-0004	10	800	10	98,5	6 990
ПЧВС-20/10-0004	20	2×800	10	98,5	13 980

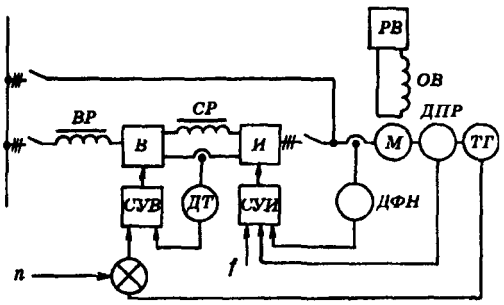


Рис. 29.7. Структурная схема электропривода серии ПЧВС

В — выпрямитель; *И* — инвертор; *СУВ* — система управления выпрямителем; *СУИ* — система управления инвертором; *ВР* — входной реактор; *СР* — сглаживающий реактор; *ДТ* — датчик тока; *ДПР* — датчик положения ротора; *ДФН* — датчик фазы ЭДС; *РВ* — регулятор возбуждения; *ТГ* — тахогенератор; *ОВ* — обмотка возбуждения

Коэффициент использоваиия двигателя в системе ПЧВС составляет 0,8÷0,9 из-за снижения $\cos\varphi$ до 0,85÷0,88 (вместо 0,9) при работе от инвертора тока с коммутацией за счет ЭДС, а также за счет дополнительных потерь от высших гармоиических тока. Меньшее значение коэффициента использования относится к турбодвигателям.

Все типы ПЧВС по мощности обеспечиваются двумя базовыми конструкциями силовых модулей на напряжеиие 6 и 10 кВ. В зависимости от номинального тока (630, 320, 200 А) предусмотрено три исполнеиия модулей с устройствами охлаждения: групповым принудительным, индивидуальным принудительным и естественным. При токах свыше 630 А выполняется параллельное соединение преобразователей частоты на ток 630 А.

В работе привода различают три режима: режим принудительиой коммутации тока в фазах инвертора (режим иизких частот), режим коммутации тока в фазах инвертора под действием ЭДС якоря ЭМП, режим синхроиизации двигателя с сетью. Основным рабочим режимом является режим коммутации тока в фазах иивертора под действием ЭДС якоря ЭМП. В данном режиме управляющие импульсы, подаваемые иа инвертор, синхронизируются по фазе ЭДС ЭМП.

Амплитуда тока якоря определяется модулем выходного сигнала регулятора частоты вращеиия и отрабатывается замкнутой системой автоматического регулирования тока воздействием на управляемый выпрямитель. Ток возбуждения автоматически регулируется в функции тока статора таким образом, что амплитуда коммутационной ЭДС не зависит от тока якоря и измеияется пропорционально частоте вращения.

В режиме низких частот вращения синхронизация импульсов управления инвертором осуществляется логическими сигналами *ДПР* относительно статора. При отсутствии *ДПР* частота инвертора в процессе пуска, торможения и реверса в области низких частот может определяться плавным изменением сигнала задания частоты; в этом варианте электропривод работает по схеме синхронного двигателя с частотным управлением.

В режиме синхронизации двигателя с сетью частота, фаза и амплитуда напряжения обмотки якоря ЭМП, питающегося от иивертора, устанавливаются равными соответствующим параметрам сети, после чего обмотка якоря подключается к сети, а ПЧ отключается.

29.7. ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И МАНИПУЛЯТОРОВ

ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА РОБОТОВ И МАНИПУЛЯТОРОВ

Вентильные двигатели, как и другие типы двигателей в составе привода промышленных роботов и манипуляторов, должны удовлетворять специфичному комплексу требований. Эта специфика определяется распространенным в настоящее время модульным принципом построения роботов из относительно независимых унифицированных устройств и необходимостью размещеиия электродвигателей непосредственно в сочленениях конструктивной схемы робота. Наиболее высокие требования предъявляются к быстродействию, перегрузочной способности двигателя, массогабаритным показателям и ресурсу. Модульный принцип предопределяет наличие более широкого ряда электродвигателей по мощности и моменту по сравиению с немодульными конструкциями. Согласно принятым требованиям для

электромехаиических модулей должны выпускаться электродвигатели 10 габаритов в диапазоие мощностей 10÷10 000 Вт с делеиием в пределах каждого габарита иа типоразмеры, отличающиеся частотой вращения и значением перемещения выходного звена.

В России была разработана серия приводов с веитильными электродвигателями (ДБМ) для редукторииых и безредукторных электромеханических систем малой и средней мощности (до 1 кВт). Освоены три серии вентильных электродвигателей (ДВУ, 2ДВУ. 3ДВУ) для приводов подач станков с ЧПУ и роботов. Охватываемый диапазон моментов 0,05÷170 Н·м и частот вращения 2000÷6000 об/мии. Для комплектации регулируемых электроприводов типа ЭПБ2, ЭАМ и других, используемых в механизмах подачи станков и роботов, созданы двигатели серии 2ДВМ с возбуждением от редкоземельных магнитов и двигатели серии 4СФ2П для электроприводов типа ЭТС1.

Электроприводы для промышлеиных роботов по своим свойствам и требоваииям, предъявляемым к иим, наиболее близки к станочным электроприводам подачи. Основные из этих требоваиий состоят в следующем:

длительно допустимый момент для электроприводов промышленных роботов лежит в пределах 0,035÷70 Н·м;

диапазон регулирования частоты вращеиия до 10 000 об/мин при возможности реверсирования;

точность регулирования электроприводов определяется относительным отклонением скорости от заданного значеиия при изменении момента иагрузки от $0{,}15M_{ном}$ до $M_{ном}$, напряжения сети от $0{,}9U_{ном}$ до $1{,}1U_{ном}$ и температуры окружающей среды от 20 до 45 °С и должиа быть:

n_{min} / n_{max}	Максимальное относительное отклонение, %, не более
1,0	0,5
0,1	2,0
0,01	5,0
0,001	10
0,0001	25

электроприводы промышленных роботов должны обеспечивать режимы позиционирования; точность позиционироваиия может достигать 1÷2 мкм, время позиционироваиия 1÷2 с; переходные процессы при позиционироваиии должны иметь апериодический характер;

для снижеиия динамических ударов в кинематике электроприводы должны обеспечивать плавность процессов пуска в момент выбора зазора и реверса после "раскрытия" зазора;

для обеспечения высокой надежности оборудоваиия электроприводы должны иметь необходимые виды защит и блокировок, средства сигнализации и диагностики.

ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ ДВУ С ФЕРРИТОВЫМИ МАГНИТАМИ

Двигатели ДВУ165 и ДВУ215 предназначены для электроприводов подач станков и роботов. Условное обозначение двигателей серии ДВУ: ДВУ двигатель вентильный управляемый; 165, 215 — диаметр окружности расположения центров отверстий иа крепительном фланце; S, M, L — условная длина сердечника статора.

В комплект двигателей ДВУ165 и ДВУ215 входят: комплект ПДФ-9 с датчиком положения и датчиком пути типа LTS_a-11с и безлюфтовый тормоз типа Н3ТБ.

Техиические даиные двигателей серии ДВУ приведены в табл. 29.6. Режим работы двигателей S1 по ГОСТ 183-74 с длительно допускаемым моментом иа валу $M_{д0}$ при частотах вращения от 0 до $0{,}25n_{max}$ и с момеитом не менее $0{,}8M_{д0}$ при частотах вращения от $0{,}25n_{max}$ до n_{max}. При частоте вращения n_{max} двигатели с номинальными частотами вращения 1500 и 1000 об/мин должны допускать работу в режиме S1 с моментом на валу $M_{д0}$, а двигатели на частотах вращения 2500 и 2000 об/мин — работу в течение 1 мин с момента на валу $0{,}5M_{д0}$.

Таблица 29.6. Технические данные двигателей серии ДВУ

Тип двигателя	$M_{д0}$, Н·м	n_{max}, об/мин	I_d, А	Масса, кг	Момент инерции, кг·м^2	Дополнительный момент ннерции, кг·м^2	Среднее ускорение, рад/с^2
ДВУ165S	7	1500 2500	2,7 5,4	22,5	0,0055	0,006	3000
ДВУ165M	10	1000 2000	2,7 5,4	26,1	0,0073	0,011	1800
ДВУ165L	13	1000 2000	3,5 7	32,2	0,0090	0,015	1800
ДВУ215S	17	1000 2000	4,2 8,4	46,2	0,0193	0,022	1700
ДВУ215M	23	1000 2000	5,8 11,5	62,4	0,0262	0,032	1700
ДВУ215L	35	1000 2000	9,2 18,4	75,6	0,0331	0,050	1400

Двигатели допускают работу в режимах S1÷S8 по ГОСТ 183-74 с момеитом не более $0{,}4M_{д0}$ в течение времени, при котором превышение температуры обмоток статора должно быть не более 100 °С.

Питание двигателей осуществляется от полупроводникового преобразователя со звеном постоянного тока напряжением от 494 до 572 В.

В переходных режимах в течение 0,2 с двигатели обеспечивают следующие перегрузки:

при n_{max} — не менее $2{,}5M_{д0}$;
при $0{,}5n_{max}$ — не менее $3{,}5M_{д0}$;
при $0{,}25n_{max}$ — не менее $4M_{д0}$.

Двигатели допускают перегрузку по току не менее $5I_{д0}$ без размагничивания. Расчетиая кратность пускового момента не менее 10 для двигателей ДВУ165 и не менее 15 для ДВУ215. Кратность максимального момента не менее 5.

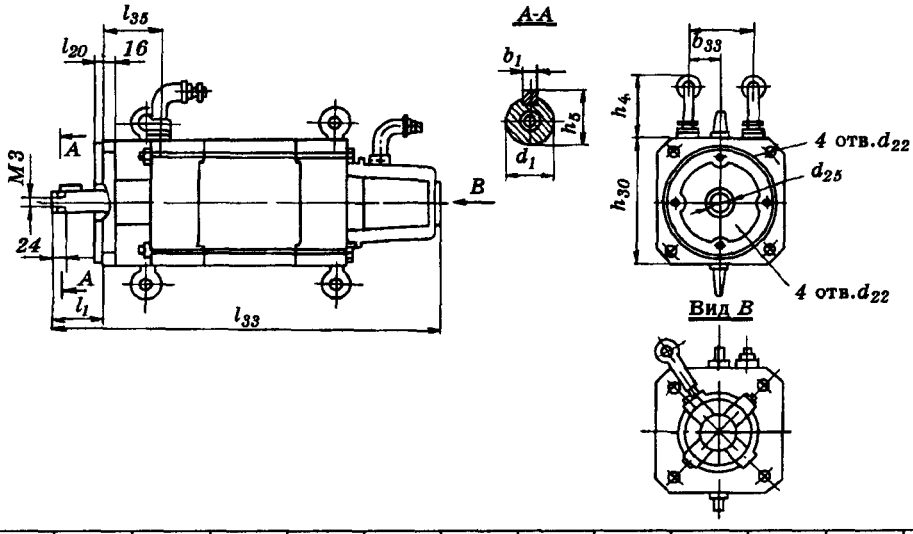
Двигатели изготовляются с числом полюсов 6, схема соединения обмотки статора — звезда с выводом нулевой точки. Количество выводных концов: 4 — от обмотки статора; 2 — от терморезисторов; 2 — от тормоза; 1 — от заземления.

Конструкция двигателей серии ДВУ по способу монтажа IM3081 по ГОСТ 2479-79. Способ охлаждения двигателей IC0040 по ГОСТ 20459-75. Степень защиты двигателей IP54 по ГОСТ 17497-72. Нагревостойкость изоляции обмоток соответствует классу F. В лобовую часть обмотки статора встраиваются терморезисторы типа СТ14-2-145.

Средний уровень звука двигателей при работе на естественной механической характеристике в режиме холостого хода при частоте вращения $0{,}5n_{max}$ ие должеи превышать 60 дБ (по шкале А), а уровни вибрации при этих условиях должны соответствовать классу 1,12 по ГОСТ 6921-83.

Двигатели должны иметь токоввод, который осуществляется через один силовой и один слаботоч-

Таблица 29.7. Габаритные, установочно-присоединительные размеры, мм, двигателей ДВУ165 и ДВУ215



Тип двигателя	l_1	l_{20}	l_{33}	l_{35}	d_1	d_{22}	d_{25}	h_4	h_5	h_{30}	b_1	b_{33}
ДВУ165S	60	3,5	473	70	28	12	130	60	31	142	8	40
ДВУ165SE												
ДВУ165M			525									
ДВУ165ME												
ДВУ165L			577									
ДВУ165LE												
ДВУ125S	80	4	588	111	32	15	180	75	35	190	10	53
ДВУ125SE												
ДВУ125M			660									
ДВУ125ME												
ДВУ125L			732									
ДВУ125LE												

Примечание. Буква Е в обозначении типа указывает на наличие встроенного тормоза.

ный соединители типа 2РТГ и отдельный токоввод и выключатель.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей даны в табл. 29.7.

ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ 2ДВУ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ

Вентильные двигатели серии 2ДВУ предназначены для работы в приводах подач станков с ЧПУ, в приводах промышленных роботов и в автоматических системах. Возбуждение двигателей 2ДВУ осуществляется от постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов. Обмотка статора трехфазная, питается от транзисторного преобразователя типа ЭТРБ-1 или ЭТРБ-2. Двигатели типа 2ДВУ55, 2ДВУ85 и 2ДВУ115 снабжены комплектом ПДФ8, двигатели типов 2ДВУ165, 2ДВУ215 и 2ДВУ265 — комплектом ПДФ9. В состав каждого из них входят датчик положения ротора, импульсный датчик пути и бесконтактный тахогенератор.

В двигатели могут быть встроены магнитоэлектрические тормоза типа Н3ТБ13. Способ охлаждения двигателей IC0041, нагревостойкость изоляции обмоток соответствует классу F. В режиме S1 двигатели обеспечивают продолжительную работу в диапазоне частот вращения:

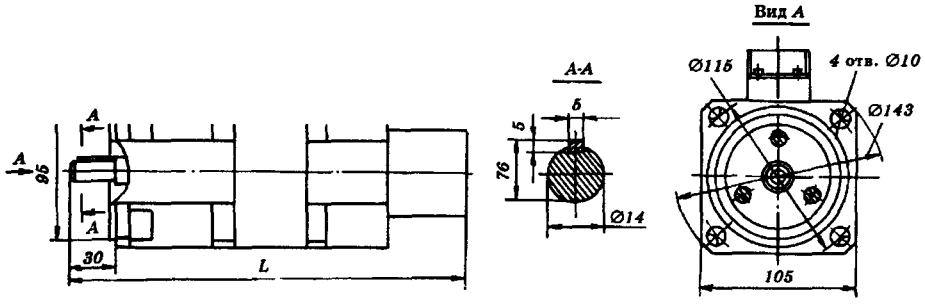
от 0 до $0{,}25n_{max}$ — с вращающим моментом, равным $M_{д0}$;

от 0,25 до n_{max} — с вращающим моментом, равным $0{,}8M_{д0}$.

Основные технические данные, а также габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей серии 2ДВУ представлены в табл. 29.8.

В двигателях со встроенным удерживающим тормозом номинальный (фиксирующий) момент тормозов должен быть не менее $M_{д0}$. В стопорном режиме двигатель допускает перегрузку с моментом $4M_{д0}$ в течение 0,5 с.

Таблица 29.8. Технические данные двигателей серии 2ДВУ



Тип двигателя	Длительный момент, Н·м	n_{max}, об/мин	Длительный момент при n_{max}, Н·м	Мощность при n_{max}, кВт	Момент инерции, кг·см^2	Масса без датчика, кг	Длина L, мм
2ДВУ55М	0,13	6000	0,12	0,07	0,089	0,6	140
2ДВУ55	0,23		0,21	0,13	0,157	0,9	165
2ДВУ85М	0,47		0,36	0,2	0,69	1,5	200
2ДВУ85	1,0	4000	0,72	0,3	1,23	2,5	230
2ДВУ115А	2,3		1,8	0,75	3,1	5	270
2ДВУ115S	3,5	3000	2,9	0,9	4,2	6	290
2ДВУ115М	4,7		3,8	1,1	5,2	7	310
2ДВУ115L	7,0		5,6	1,75	7,3	9	350
2ДВУ165S	13	2000	11	2,3	39	16	439
2ДВУ165М	17		14	3	51	19	464
2ДВУ165L	23		19	4	69	23	517
2ДВУ215S	35		30	6,3	134	38	572
2ДВУ215М	47		40	8,4	176	45	622
2ДВУ215L	70		48	10	239	56	696
2ДВУ265S	100		72	15	442	86	685
2ДВУ265М	130		91	19	581	109	760
2ДВУ265L	170		106	22	720	132	835

Уровень шума двигателей при максимальной частоте вращения в режиме холостого хода должен соответствовать третьему классу по ГОСТ 16372-84.

Уровень вибрации двигателей при работе в режиме холостого хода с частотой вращения n_{max} соответствует по ГОСТ 16921-83:

для двигателей 2ДВУ115А, 2ДВУ115М — классу 0,71;

для двигателей 2ДВУ115, 2ДВУ165 — классу 1,12.

Коиструктивное исполнение по способу монтажа IM3081 по ГОСТ 2479-79. Условия эксплуатации двигателей в отношении воздействия механических факторов — по группе М8, ГОСТ 17516-72. Нормальные значения климатических факторов внешней среды для климатического исполнения 04 и УХЛ4 по ГОСТ 15150-69.

Для двигателей исполнения 04 допускается снижение момента $M_{д0}$ по сравнению с исполнением УХЛ4 на одну ступень.

Степень защиты двигателей от воздействия окружающей среды IP54 по ГОСТ 17494-72.

Обмотки статора соединены в звезду, нулевая точка выведеиа. Количество выводных концов: четыре от обмотки статора; два от цепн терморезисторов; два от тормоза; один вывод заземления.

Технические данные комплектов ПДФ8 и ПДФ9, магнитоэлектрических тормозов типа НЗТБ13, а также преобразователей типа ЭТРБ представлеиы в табл. 29.9—29.11.

ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ СЕРИИ 2ДВМ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ

Двигатели серии 2ДВМ предназначены для комплектации регулируемых электроприводов типа ЭПБ2, ЭАМ и других, используемых в механиизмах подачи станков и роботов. Двигатели содержат

Таблица 29.9. Технические даиные тахогеиераторов, входящих в комплект ПДФ

Параметры	ПДФ8	ПДФ9
Тип тахогенератора	ТС-45	ТС-71
Крутизна выходной характеристики, мВ/(об/мин)	2,5	2,5
Нестабильность выходного напряжения, %	2,5	1,5
Температурный дрейф, %	—2,0	—2,0
Номинальная нагрузка, кОм	20	20
Момент инерции ротора, кг·см^2	0,06	0,51
Диапазон частоты вращения, об/мин	0÷6000	0÷6000
Общая масса, кг	0,6	1,9
Возможное число импульсов датчика пути на один оборот	250, 500, 625, 1250, 2500	

Таблица 29.10. Технические данные тормозоа

Параметр	НЗТБ13-08	НЗТБ13-11	НЗТБ13-13	НЗТБ13-14
Тормозной момент, Н·м	7	25	63	85
Напряжение включения, В	24	24	24	24
Потребляемая мощность, Вт	12	22	26	38
Время включения, мс	55	55	100	100
Время выключения, мс	18	18	100	100
Момент инерции, кг·см^2	2	12	30	95
Масса, кг	0,8	2,3	5,6	7,6

Таблица 29.11. Технические данные преобразователей

Параметр	Блок питания		Блок управления	
	ЭТРБ-1	ЭТРБ-1М	ЭТПБ-1М	ЭТРБ-1М
Напряжение, В:				
входное	380±38		520±52	
выходное	520±52		0÷520	
Ток, А:				
номинальный	50	50	25	50
максимальный	75	100	50	100
Глубина регулирования	—		1:10 000	
Габаритные размеры, мм	160×350×340		160×350×340	

встроенные датчики положения ротора и обратной связи по скоростн (тахогенератор). Предусмотрены исполнения со встроеииым аварийным тормозом и исполнение с возможиостью пристройки потребителем фотоэлектрического преобразователя угловых перемещеиий модели ВЕ178А.

Коиструктивно двигатель представляет собой синхронную машину с возбуждением от постояиых магнитов, расположенных на роторе в виде сегментных плиток из редкоземельных элементов. Обмотка статора двухслойная трехфазная. Со стороны заднего подшипникового щита устаиовлен корпус датчика положения ротора и датчика скорости. На корпусе закреплены кронштейны с фотоэлементами, статор тахогеиератора и печатная плата преобразователя импульсов. На валу двигателя расположен ротор тахогенератора с металлическим растровым диском. К корпусу узла встроенных датчиков может

быть прикреплеи датчик пути. Магнитоэлектрический аварийный тормоз встроен в передний подшипниковый щит двигателя. Перед подачей питающего напряжеиия на обмотку статора напряжение подается на обмотку тормоза, и вал двигателя растормаживается.

Структура условного обозначения двигателей серии 2ДВМ:

2ДВМ-ХХХ-ХХ-Х-Х-Е-Т-Х4,

где 2 — порядковый номер серии;

ДВМ — двигатель вентильиый с возбуждением от постоянных магнитов;

ХХХ — двух- или трехзиачное число — диаметр фланца (диаметр окружности расположеиия цеитров отверстий);

ХХ — двухзиачное число, характеризующее зиачение длительного момента;

Х — максимальиая скорость, тыс. мин$^{-1}$;

Х — цифра, характеризующая значение напряжения в звене постоянного тока преобразователя: 0 при $U = 60$ В; 3 — при $U = 300$ В; 5 — при $U = 520$ В;

Е — исполнеиие с тормозом;

Т — исполнение с возможностью пристройки фотоэлектрического преобразователя;

Х4 — вид климатнческого исполнеиия (УХЛО) по ГОСТ 15150-69.

Рабочее положеиие двигателей в пространстве любое. Верхнее зиачение рабочей температуры 35 °С для исполнения УХЛ4 и 45 °С — для 04. Нижнее значение рабочей температуры 7 °С. Верхнее значение относительной влажности для исполнения УХЛ4 80% при 25 °С, для исполнеиия 04 — 98% при 35 °С. Окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию. Степень защиты двигателей IP54 или IP65 по ГОСТ 17494-72.

Изоляция двигателей класса нагревостойкости F по ГОСТ 8865-70. Превышение температуры обмотки статора в иоминальном режиме не более 100 °С. Средний уровень шума при максимальной частоте вращения в режиме холостого хода не превышает:

для двигателей 2ДВМ85 исполнения ХХ2Х — 69 дБ, для исполиения ХХ4Х, ХХ6Х — 73 дБ;

для двигателей 2ДВМ115 исполнения ХХ2Х — 73 дБ, для исполнения ХХ4Х, ХХ6Х — 82 дБ.

Среднеквадратичное значение вибрациоиной скорости при работе двигателя во всем диапазоне частот вращения соответствует классу 1,12 по ГОСТ 16.921-83. Конструктивное исполнение по способу монтажа IM3081 по ГОСТ 2479-79. Номинальный режим работы двигателей S1 по ГОСТ 183-74 с длительным моментом на валу $M_{д0}$ при частотах вращения от 0 до $0{,}5n_{max}$ и с моментом $0{,}8M_{д0}$ при частотах вращения от $0{,}5n_{max}$ до n_{max}. Двигатели допускают работу в режимах S2÷S8 по ГОСТ 183-74 с моментом ие более $5M_{д0}$ в течение времеии, при котором превышение температуры обмотки статора менее 100 °С. Способ охлаждения двигателя IC0040 по ГОСТ 20459-75.

Таблица 29.12. Основные параметры двигателей серии 2ДВМ

Тип двигателя	M_{d0}, Н·м (ие меиее)	E, В	n_{max}, об/мин
2ДВМ85 0220 УХЛ4	0,23	22	2000
2ДВМ85 0240 УХЛ4	0,23	22	4000
2ДВМ85 0260 УХЛ4	0,23	22	6000
2ДВМ85 0420 УХЛ4	0,47	22	2000
2ДВМ85 0440 УХЛ4	0,47	22	4000
2ДВМ85 0460 УХЛ4	0,47	22	6000
2ДВМ85 0720 УХЛ4	0,70	22	2000
2ДВМ85 0740 УХЛ4	0,70	22	4000
2ДВМ85 0223 УХЛ4	0,23	135	2000
2ДВМ85 0243 УХЛ4	0,23	135	4000
2ДВМ85 0263 УХЛ4	0,23	135	6000
2ДВМ85 0423 УХЛ4	0,47	135	2000
2ДВМ85 0443 УХЛ4	0,47	135	4000
2ДВМ85 0463 УХЛ4	0,47	135	6000
2ДВМ85 0723 УХЛ4	0,7	135	2000
2ДВМ85 0743 УХЛ4	0,7	135	4000
2ДВМ85 0763 УХЛ4	0,7	135	6000
2ДВМ85 1023 УХЛ4	1,3	135	2000
2ДВМ85 1043 УХЛ4	1,3	135	4000
2ДВМ85 1063 УХЛ4	1,3	135	6000
2ДВМ115 2023 УХЛ4	2,3	135	2000
2ДВМ115 2043 УХЛ4	2,3	135	4000
2ДВМ115 2063 УХЛ4	2,3	135	6000
2ДВМ115 3023 УХЛ4	3,5	135	2000
2ДВМ115 3043 УХЛ4	3,5	135	4000
2ДВМ115 3063 УХЛ4	3,5	135	6000
2ДВМ115 4023 УХЛ4	4,7	135	2000
2ДВМ115 4043 УХЛ4	4,7	135	4000
2ДВМ115 4063 УХЛ4	4,7	135	6000
2ДВМ115 7023 УХЛ4	7	135	2000
2ДВМ115 7043 УХЛ4	7	135	4000
2ДВМ115 7063 УХЛ4	7	135	6000
2ДВМ115 2025 УХЛ4	2,3	250	2000
2ДВМ115 2045 УХЛ4	2,3	250	4000
2ДВМ115 2065 УХЛ4	2,3	250	6000
2ДВМ115 3025 УХЛ4	3,5	250	2000
2ДВМ115 3045 УХЛ4	3,5	250	4000
2ДВМ115 3065 УХЛ4	3,5	250	6000
2ДВМ115 4025 УХЛ4	4,7	250	2000
2ДВМ115 4045 УХЛ4	4,7	250	4000
2ДВМ115 4065 УХЛ4	4,7	250	6000
2ДВМ115 7025 УХЛ4	7	250	2000
2ДВМ115 7045 УХЛ4	7	250	4000
2ДВМ115 7065 УХЛ4	7	250	6000

Примечание M_{d_0} — длительный момент на валу; E ллнейная ЭДС, n_{max} — максимальная частота вращения

В двигателях со встроенными магнитоэлектрическими тормозамн (исполнение Е) значение тормозного момента (фиксирующего) не ниже $M_{д0}$. Напряжение питания тормоза должно быть не менее 24 В ±10% В постоянного тока

Основиые параметры двигателей указаны в табл. 29.12 и 29.13. Габаритные, установочные и прнсоединительные размеры двигателей приведены на рис 29.8 н 29 9.

Таблица 29.13. Основные массогабаритные данные двигателей серии 2ДВМ

Тип двигателя	Осевой габарит L, мм	Масса, кг
2ДВМ85 02ХХ УХЛ4	154	2
2ДВМ85 02ХХ ТУХЛ4	193	2,15
2ДВМ85 02ХХЕ УХЛ4	176	2,5
2ДВМ85 02ХХ ТУХЛ4	215	2,65
2ДВМ85 04ХХ УХЛ4	164	2,3
2ДВМ85 04ХХ ТУХЛ4	203	2,45
2ДВМ85 04ХХЕ УХЛ4	186	2,8
2ДВМ85 04ХХЕ ТУХЛ	225	2,95
2ДВМ85 07ХХ УХЛ4	184	2,9
2ДВМ85 07ХХ ТУХЛ4	223	3,5
2ДВМ85 07ХХЕ УХЛ4	206	3,4
2ДВМ85 07ХХ4 ТУХЛ4	245	3,55
2ДВМ85 10ХХ УХЛ4	204	3,6
2ДВМ85 10ХХ ТУХЛ4	243	3,75
2ДВМ85 10ХХЕ УХЛ4	226	4,1
2ДВМ85 10ХХЕ ТУХЛ4	265	4,25
2ДВМ115 20ХХ УХЛ4	248	6,7
2ДВМ115 20ХХ ТУХЛ4	286	6,85
2ДВМ115 20ХХЕ УХЛ4	276	7,7
2ДВМ115 20ХХЕ ТУХЛ4	314	7,85
2ДВМ115 30ХХ УХЛ4	268	7,8
2ДВМ115 30ХХ ТУХЛ	306	7,95
2ДВМ115 30ХХЕ УХЛ4	296	8,8
2ДВМ115 30ХХЕ ТУХЛ4	334	8,95
2ДВМ115 40ХХ УХЛ4	288	9,1
2ДВМ115 40ХХ ТУХЛ4	326	9,25
2ДВМ11 40ХХЕ УХЛ4	316	10,1
2ДВМ115 40ХХЕ ТУХЛ4	354	10,3
2ДВМ115 70ХХ УХЛ4	326	11,4
2ДВМ115 70ХХ ТУХЛ4	366	11,6
2ДВМ115 70ХХЕ УХЛ4	356	11,4
2ДВМ115 70ХХЕ ТУХЛ4	394	12,6

БЕСКОНТАКТНЫЕ МОМЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ СЕРИЙ ДБМ И ДБМ-Р18

Двигатели этих серий спроектированы оптимальными по статической добротности, т. е. по наибольшему удельному моменту в единице массы и электрических потерь в обмотке якоря. Областями применения бесконтактных моментных электродвигателей и бесконтактных моментных приводов на их основе являются:

быстродействующие программные или следящие системы и системы угловой стабилизации высокой точности с динамической погрешностью 1÷3 угловых минуты и менее (обычно в безредукторном исполнении);

системы автоматического управления в редукторном или безредукторном исполнении;

исполнительные системы управления роботов и манипуляторов;

привод лентопротяжных механизмов звуко- и видеозаписывающей аппаратуры, а также устройств внешней памяти ЭВМ;

медицинское приборостроение (в безредукторном исполнении);

бытовая техника — стиральные машины, кухонные комбайны и т. п. (в безредукторном исполнении).

Электродвигатели серии ДБМ разработаны во встраиваемом исполнении, обеспечивающем возможность наращивания момента и мощности за счет соосной установки двигателей, пропуска волноводов, световодов или кабелей через центральное отверстие в роторе, которое является посадочной поверхностью. Ротор многополюсный с тангенциальным намагничиванием магнитов, изготовленных из самарий-кобальта. Отношение осевой длины ротора к его диаметру составляет 0,2÷0,4. Конструктивные детали ротора (внутренняя втулка, торцевые шайбы, лента по наружному диаметру) выполнены из немагнитной нержавеющей стали; полюсы, выполняющие роль концентраторов магнитного потока, шихтованные из листов материала 50Н толщиной 0,5 мм. При проектировании конструкции статора принималось во внимание, что применение двигателей ДБМ возможно как в следящих системах повышенной точности, где предъявляются жесткие требования к значению пульсаций вращающего момента и к уровню остаточного момента сопротивления, так и в системах меньшей точности. Поэтому в серии ДБМ принято два конструктивных исполнения статора:

гладкий (беспазовый) статор с двухслойной петлевой обмоткой, расположенной непосредственно в воздушном зазоре, что позволяет обеспечить малые электромагнитные постоянные времени обмоток, отсутствие реактивного остаточного момента сопротивления и пульсаций вращающего момента, им вызываемых;

пазовый статор с двухслойной петлевой обмоткой, позволяющий обеспечить более высокую магнитную индукцию в воздушном зазоре и соответственно более высокую статическую добротность, а также меньшую электромеханическую постоянную времени, чем у двигателей с гладким статором.

В двигателях с гладким статором магнитопровод, одновременно играющий и роль корпуса, выполняется сплошным из стальной магнитомягкой трубы; наружный диаметр является посадочным. Магнитопровод двигателей с пазовым статором шихтованный из листов электротехнической стали, установлен в корпусе из алюминиевого сплава. Наружный диаметр корпуса является посадочным. Лобовые части обмотки статора закрыты пластмассовыми крышками.

Двигатели серии ДБМ не имеют ни вала, ни подшипников, и сборка их осуществляется самим потребителем при монтаже сборочных единиц двигателя — ротора и статора в механизме привода.

Среди разработанных электродвигателей серии ДБМ имеются специально спроектированные двигатели, обладающие индивидуальными особенностями. Например, электродвигатель 2ДБМ70-0,16-3-3 выполнен с увеличенным воздушным зазором, позволяющим разместить в нем немагнитный экран, герметически разделяющий полости статора и ротора. У электродвигателя 2ДБМ70-0,25-1-2 ротор снабжен концентраторами торцевого магнитного рассеяния, предназначенными для обеспечения ра-

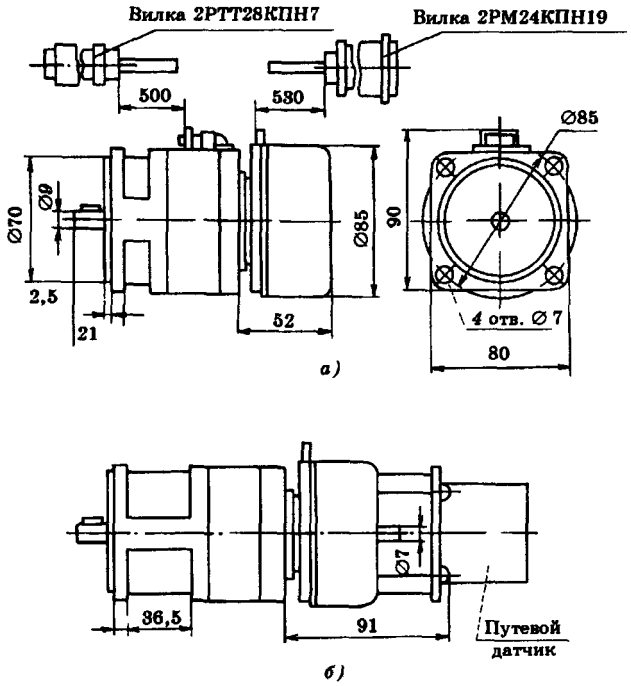


Рис. 29.8. Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателя 2ДВМ85

а — основное исполнение; б — исполнение Т

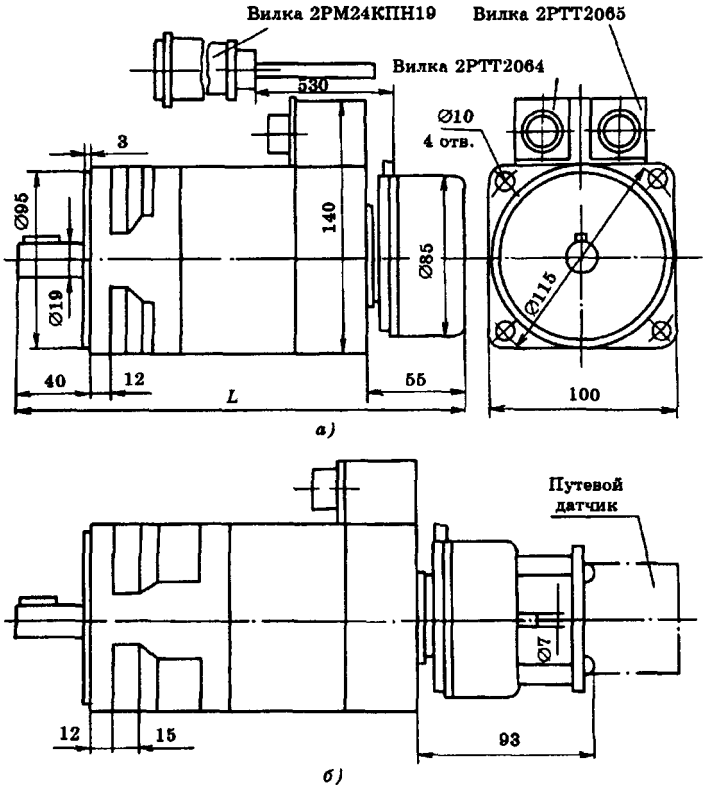


Рис. 29.9. Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателя 2ДВМ115

а — основное исполнение; б — исполнение Т

боты специального индуктивного датчика положения ротора.

Размерно-параметрические ряды двигателей серии ДБМ с гладким и пазовым статором основаны на базовых исполнениях двигателей каждого типоразмера. Помимо базового исполнения для каждого типоразмера предусмотрены модификации, отличающиеся обмоточными данными статора, которые выбраны таким образом, что каждая следующая модификация имеет вдвое меньшее число витков в обмотке статора при вдвое большем сечении проводника.

Наружный посадочный диаметр статора и максимальный статический синхронизирующий момент базового исполнения включены в условное обозначение двигателя, структура которого следующая, например для ДБМ120-1-0,4-2:

ДБМ — двигатель бесконтактный моментный;

120 — наружный диаметр статора, мм;

1 — максимальный статический синхронизирующий момент базового исполнения, Н·м;

0,4 — частота вращения при холостом ходе, тыс. об/мин (округленно);

2 — число фаз обмотки.

Для двигателей ДБМ в качестве датчиков положение ротора *ДПР* могут быть использованы любые обычные вращающиеся трансформаторы либо датчики, применяемые для вентильных двигателей других типов: индуктивные, оптические, кодовые и т. д. Однако с учетом модульного принципа построения и встраиваемости конструкции для ДБМ разработаны специальные виды *ДПР* — бесконтактные индукторные СКВТ (типа редуктосин) серии ВТ и ТС, имеющие такое же встраиваемое конструктивное исполнение и устанавливаемые на одном валу с двигателем. Для некоторых типоразмеров двигателей серии ДБМ разработаны индуктивные датчики типа ПИМ [29.17], поставляемые в комплекте с двигателем (в этом случае к обозначению двигателя добавляется индекс Д25). Эти датчики служат для дискретного измерения углового положения ротора и устанавливаются так, чтобы их чувствительные элементы находились вблизи торцевых поверхностей ротора двигателя, имеющих значительные торцевые потоки рассеяния, которые и используются для подмагничивания сердечников датчика. Достоинствами датчиков типа ПИМ являются стабильность при изменении внешних условий и минимальное влияние погрешностей при монтаже двигателя с датчиком в приводной механизм.

Двигатели серии ДБМ-18 отличаются от двигателей серии ДБМ усовершенствованной магнитной системой ротора. Ротор представляет собой кольцо, собранное из полюсных и межполюсных магнитов, создающих тангенциально-радиальное намагничивание [29.18]. При этом полюсный магнит намагничен в радиальном направлении, а межполюсный — в тангенциальном. Такая конструкция позволяет более полно использовать объем ротора для заполнения магнитотвердым материалом. Она получила название РОМС — ротор оптимизированный мозаичный сборный. В качестве материала был использован значительно более дешевый феррит стронция.

У двигателей с такими роторами к обозначению ДБМ добавлен индекс Р18. Цена двигателей в результате снизилась в 2÷3 раза при некотором ухудшении технико-экономических показателей. Следует также отметить еще одну характерную особенность двигателей с роторами из феррита стронция — значительно большую (примерно в 4 раза) зависимость коэффициентов момента и ЭДС (C_M и C_E) от температуры окружающей среды, чем у двигателей с ротором из редкоземельных магнитов. Эта особенность является прямым следствием более высокого температурного коэффициента в пределах обратимых температурных изменений магнитных характеристик феррита стронция.

Основные технические характеристики двигателей серии ДБМ и ДБМ-Р18 приведены в табл. 29.14.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД РОБОТА С РЕЛЕЙНЫМ ЗАКОНОМ УПРАВЛЕНИЯ ТИПА ДБ60-10-4

Для автономных роботов, использующихся для выполнения операций в местах, недоступных человеку, одной из важнейших является навигационная система, обеспечивающая устойчивую связь робота с оператором. Связь с оператором и центральной системой управления осуществляется с помощью радиопередатчика. В релейном режиме электропривод обесточен в течение времени, когда угол рассогласования между осями антенн меньше допустимого. При достижении углом рассогласования граничного значения на привод подается соответствующий сигнал и он разворачивает антенну робота против направления движения. После отработки заданного рассогласования привод переходит в режим динамического торможения.

Электродвигатель ДБ60-10-4 имеет раздельное исполнение электрической машины и коммутатора. Технические данные электродвигателя следующие:

Напряжение питания, В	27^{+35}_{-3}
Номинальная мощность на валу, Вт	10
Номинальный вращающий момент, Н·м	0,0239
Номинальная частота вращения, об/мин	4000±400
Номинальный потребляемый ток, А	0,7
Пусковой момент, Н·м	0,0882
Масса двигателя, кг	0,55
Масса коммутатора, кг	0,45

ВД допускает режим переключения с последующим реверсом с максимальной частотой вращения. Коммутатор содержит узлы, которые по сигналам системы управления обеспечивают пуск, реверс и динамическое торможение электродвигателя. Конструкция электродвигателя ДБ60-10-4 показана на рис. 29.10.

Двигатель состоит из корпуса *1*, статора *2*, ротора *9*, статора *ДПР 6* и подшипникового щита *14*. В щит *14* и корпус *1* запрессованы втулки *5* и *12*, в которых имеются гнезда для шарикоподшипников *4* и

Таблица 29.14. Основные технические характеристики двигателей серии ДБМ и ДБМ-Р18

Тип двигателя	Амплитуда фазного напряжения, В	Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	Пусковой момент, Н·м	Электромеханическая постоянная времени, мс	Число пар полюсов	Момент инерции ротора, кг·м^2	Момент сопротивления при обесточенных обмотках, Н·м (не более)	Предельно допустимое напряжение, В	Предельно допустимая амплитуда тока в фазе обмотки статора, А	Число фаз обмотки статора	Масса, кг
ДБМ40-0,01-2,5-3	18	3900÷6400	0,02	105	4	$6\cdot10^{-6}$	0,001	60	2,0	3	0,12
ДБМ40-0,01-5-3	18	7800÷10800	0,041	105	4	$6\cdot10^{-6}$	0,001	60	4,6	3	0,12
ДБМ40-0,01-4-2-Р18	27	4600÷5400	0,02	130	4	$6\cdot10^{-6}$	0,001	50	2,5	2	0,13
ДБМ40-0,01-5-3-Д25	27	5000±1000	—	75	4	$6\cdot10^{-6}$	0,001	60	—	3	0,155
ДБМ40-0,025-4-3	18	5700÷7200	0,11	43	4	10^{-5}	0,0025	60	10	3	0,21
ДБМ40-0,025-4-3-Д25	27	4600±600	—	40	4	10^{-5}	0,0025	60	—	3	0,25
ДБМ50-0,04-3-2	27	2900÷3900	0,066	24,7	4	$6\cdot10^{-6}$	0,002	80	6,5	3	0,18
ДБМ50-0,04-6-2	27	5800÷7800	0,135	24,3	4	$6\cdot10^{-6}$	0,002	80	13	3	0,18
ДБМ63-0,06-3-2	27	2700÷3400	0,11	160	8	$0,7\cdot10^{-4}$	0,003	60	10	2	0,32
ДБМ70-0,16-1,5-2	27	1200÷1700	0,3	25,5	8	$0,7\cdot10^{-4}$	0,008	80	12	2	0,36
ДБМ70-0,16-3-2	27	2400÷3400	0,6	25,5	8	$0,7\cdot10^{-4}$	0,008	80	24	2	0,36
ДБМ70-0,16-3-3	27	3400÷4000	0,72	30,5	8	$0,7\cdot10^{-4}$	0,008	50	27	3	0,36
2ДБМ70-0,16-3-3	27	3440÷4000	0,72	30,5	8	$0,7\cdot10^{-4}$	0,008	50	27	3	0,36
ДБМ70-0,25-1-2	27	850÷1050	0,42	20	8	10^{-4}	0,015	60	12	2	0,5
2ДБМ70-0,25-1-2	27	850÷1050	0,42	20	8	10^{-4}	0,015	60	12	2	0,5
ДБМ85-0,16-2-2	27	2000÷2350	0,27	160	8	$2,3\cdot10^{-4}$	0,008	60	20	2	0,52
ДБМ85-0,16-2-3	18	1850÷2350	0,28	157	8	$2,3\cdot10^{-4}$	0,008	60	17,5	3	0,52
ДБМ100-0,4-0,75-2	27	750÷950	0,7	22,8	8	$2,3\cdot10^{-4}$	0,02	80	18	2	0,7
ДБМ100-0,4-1,5-2	27	1500÷1900	1,4	22,8	8	$2,3\cdot10^{-4}$	0,02	80	36	2	—
ДБМ105-0,4-0,75-3	18	720÷1000	0,85	103	8	10^{-3}	0,02	60	10	3	0,98
ДБМ105-0,6-0,5-3	18	500÷610	1,1	77	8	$1,5\cdot10^{-3}$	0,03	60	15	2	1,3
ДБМ105-0,6-1-2	27	900÷1100	1,3	92	8	$1,5\cdot10^{-3}$	0,03	60	30	3	1,32
ДБМ120-1-0,2-2	27	230÷260	1,15	19,4	8	10^{-3}	0,05	60	12,5	2	1,3
ДБМ120-1-0,4-2	27	460÷520	2,3	19,4	8	10^{-3}	0,05	60	25	2	1,3

Окончание табл. 29.14

Тип двигателя	Амплитуда фазного напряжения, В	Частота вращения при идеальном холостом ходе, об/мин	Пусковой момент, Н·м	Электромеханическая постоянная времени, мс	Число пар полюсов	Момент инерции ротора, $кг \cdot м^2$	Момент сопротивления при обесточенных обмотках, Н·м (не более)	Предельно допустимое напряжение, В	Предельно допустимая амплитуда тока в фазе обмотки статора, А	Число фаз обмотки статора	Масса, кг
ДБМ120-1-0,8-2	27	920÷1040	3,9	22,9	8	10^{-3}	0,05	60	50	2	1,3
ДБМ120-1-2-2-Р18	110	1700÷2000	5,2	—	8	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	0,05	380	11	2	1,8
ДБМ120-1-0,4-2-Р18	27	380÷460	0,96	—	8	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	0,05	50	10	2	1,8
ДБМ120-1-2,5-2-Р18	48	2500÷3100	6,0	—	8	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	0,1	80	40	2	1,6
ДБМ120-1,6-0,5-3-Д25	27	500÷100	—	16	8	—	—	—	60	3	2,0
ДБМ130-1,6-0,5-2	27	420÷520	1,5	80	8	$3 \cdot 10^{-4}$	0,08	60	40	2	2,5
ДБМ140-1,6-0,6-2-Р18	27	520÷620	3,4	—	8	$8{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,06	100	20	2	2,3
ДБМ140-1,6-0,7-2-Р18	27	630÷720	4,2	—	8	$8{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,06	100	30	2	2,3
ДБМ140-1,6-6-3-Р18	140	5100÷6700	23,3	—	8	$8{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,16	380	25	3	2,1
ДБМ150-4-0,3-2	27	320÷360	7,4	13,5	8	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2	60	60	2	3,0
ДБМ150-4-0,6-2	27	640÷720	13,5	15,0	8	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2	60	120	2	3,0
ДБМ150-4-1,5-3	18	1720÷1910	37,4	—	8	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2	60	330	3	3,1
ДБМ185-6-0,2-2	27	190÷230	11,2	15,0	8	$9 \cdot 10^{-3}$	0,3	60	60	2	5,4
ДБМ185-6-0,4-2	27	390÷450	21,8	15,2	8	$9 \cdot 10^{-3}$	0,3	60	120	2	5,4
ДБМ185-10-0,04-3	18	52÷59	13	5,9	8	$15 \cdot 10^{-3}$	0,5	110	22	3	9,3
ДБМ185-10-0,04-2	27	35÷39	7,8	6,4	8	$15 \cdot 10^{-3}$	0,5	110	17	2	9,3
ДБМ185-16-0,15-2	27	140÷160	27,3	7,8	8	$15 \cdot 10^{-3}$	0,8	60	110	2	9,3
ДБМ185-16-0,3-2	27	290÷320	49,0	8,6	8	$15 \cdot 10^{-3}$	0,8	60	220	2	9,25

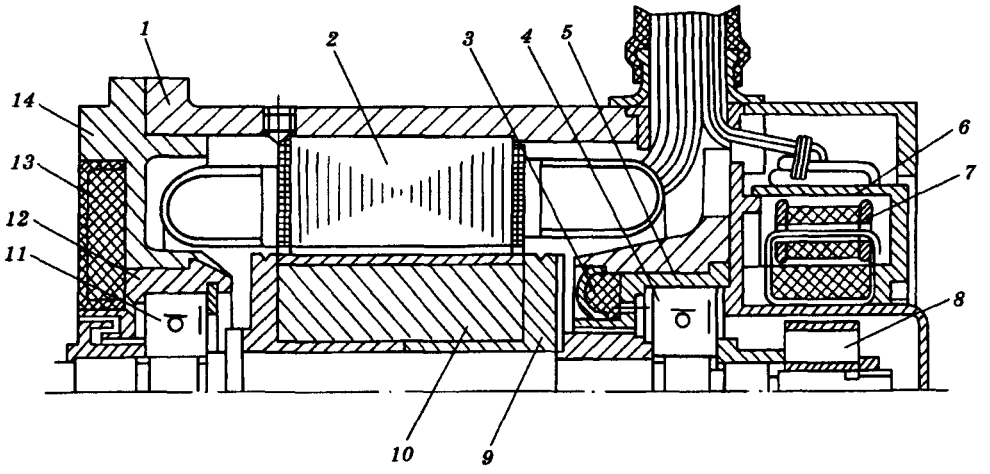


Рис. 29.10. Конструктивная схема электродвигателя ДБ60-10-4

11. Для увеличения ресурса работы двигателя в корпусе *1* и щите *14* размещены подпиточные узлы *3* и *13*, из которых смазка в процессе эксплуатации поступает в подшипники. На роторе *9* установлены цилиндрический четырехполюсный постоянный магнит *10* индикатора, намагниченный радиально, и два магнита *8* сигнального элемента *ДПР*, намагниченные в осевом направлении. Магниты индуктора и *ДПР* изготовлены из высококоэрцитивного сплава КСП-37 ($SmCo_5$), обеспечивающего наибольшую удельную энергию магнитного поля в воздушном зазоре и как следствие минимальные габариты и массу машины при заданной мощности.

На статоре *6 ДПР* установлены четыре индуктивных чувствительных элемента *7*, представляющих собой дроссели насыщения с замкнутым магнитопроводом, навитым из ленточного пермаллоя 50НП (два витка ленты шириной 2 и толщиной 0,1 мм). Обмотка каждого дросселя содержит 400 витков. В пазах пакета статора *2* уложена четырехсекционная (четырехфазная) распределенная обмотка, выполненная аналогично многофазным обмоткам синхронных машин. Секции якорной обмотки сдвинуты на 90° и коммутируются полупроводниковыми ключами, выполненными в виде интегральной микросхемы. При подаче на вход коммутатора напряжения питания режим работы ВД будет определяться видом поступающих на него команд: "Вправо", "Влево", "Торможение". Команда "Торможение" обеспечивает отключение элементов коммутатора от питающей сети и автоматический перевод двигателя в режим динамического торможения.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОВ ТИПА ДБ60-90-6

Для привода транспортных роботов требуются электродвигатели с механической характеристикой, близкой к линии равной механической мощности. Такой характеристикой обладает ВД типа ДБ60-90-6. Технические данные электродвигателя следующие:

Напряжение питания, В	27^{+5}_{-3}
Номинальная мощность на валу, Вт	40
Номинальная частота вращения, об/мин	6000
Пусковой ток, А	6
Максимальная мощность на валу, Вт	90
КПД при частотах вращения 2400 и 5500 об/мин	0,6
Диапазон регулирования частоты вращения вала при постоянном моменте на валу 0,029 Н·м (не менее)	1:100
Жесткость механических характеристик при регулировании, % (не менее)	4
Масса двигателя, кг	1,2
Масса коммутатора, кг	1,8

Электродвигатель работает в двух режимах.

Режим 1. Пуск и работа при нагрузочном моменте в диапазоне 0,0294÷0,294 Н·м, где реализуется режим постоянной потребляемой от источника мощности при механической характеристике в виде линии равной мощности (Mn = const).

Режим 2. Реверс с любой частоты вращения в диапазоне нагрузочных моментов 0,0294÷0,294 Н·м. Разгон при реверсе осуществляется при постоянном моменте на валу двигателя.

Конструкция ВД (рис. 29.11) включает в себя электрическую машину (синхронный электродвигатель) *1*, синхронный тахогенератор *3* и *ДПР 5*. На валу *11* закреплены постоянные магниты системы возбуждения двигателя *10* и тахогенератора *9* и ротор *7 ДПР*. В подшипниковых щитах размещены подпиточные узлы *8* и *12*, из которых в процессе эксплуатации двигателя смазка поступает в подшипники. *ДПР 5* совместно с корпусом *6* может поворачиваться относительно подшипникового щита *4*, закрепленного в корпусе *2*. Это позволяет устанавливать оптимальный угол между *ДПР* и синхронным двигателем, чтобы таким образом обеспе-

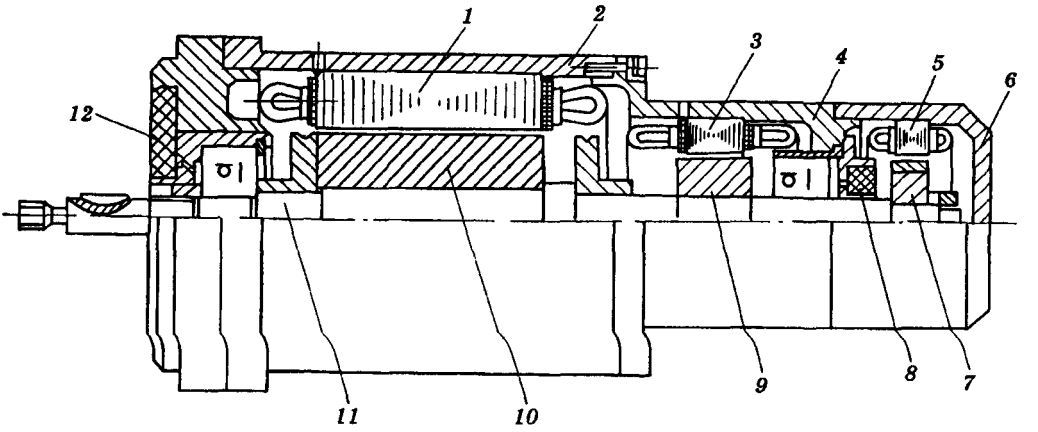


Рис. 29.11. Конструкция электродвигателя ДБ60-90-6

чить максимальный КПД в номинальном режиме работы.

В качестве *ДПР* использован аналоговый датчик микросинного типа. Выходное напряжение *ДПР* изменяется в функции угла поворота ротора по синусоидальному закону, что позволяет получить глубокое регулирование частоты вращения двигателя, а две системы обмоток *ДПР*, сдвинутых в пространстве, обеспечивают симметрию характеристик двигателя при реверсе. Постояный магнит *10* индикатора электрической машины ВД выполнен из материала ЮНДК35Т5БА. Тахогенератор имеет шестифазную распределенную обмотку на статоре и четырехполюсный ротор. На статоре электрической машины имеются две системы двухфазиых обмоток. Обмотки каждой фазы расположены в одних и тех же пазах статора двигателя *1*.

Рабочие характеристики электродвигателя представлены на рис. 29.12, из которого видно, что переход на нижнюю ветвь гиперболы, когда работают обе последовательно соединенные обмотки, сопровождаются ростом КПД и поддержанием его на примерно одном уровне (около 0,6). Имеющийся провал в кривой КПД в режиме токоограничения обусловлен ростом динамических потерь в силовых переключающих элементах при импульсном регулировании тока.

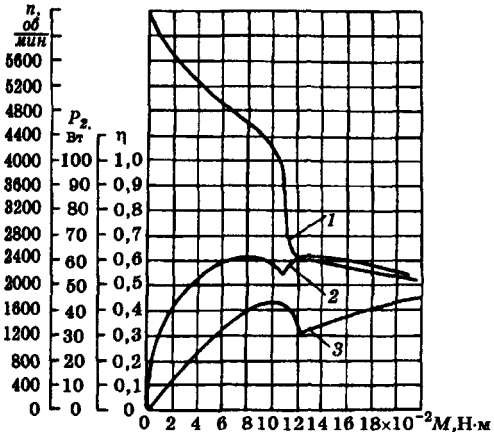


Рис. 29.12. Рабочие характеристики электродвигателя ДБ60-90-6

1 — механическая характеристика; *2* — зависимость КПД от момента нагрузки; *3* — мощность на валу

ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Исполнительный электромеханический модуль представляет собой унифицированиый механизм, имеющий одну степень подвижности и являющийся базовым устройством для компоновки механической части агрегата. В качестве ВД для электромеханических модулей во многих случаях применяются низкоскоростные электрические машины (моментные двигатели). Серьезным недостатком модулей с высокоскоростными ВД являются низкий КПД, обусловленный низким КПД редуктора (около 0,7), большая динамическая мощность и сравнительно низкое быстродействие из-за большого приведенного момента инерции, обусловленного моментами инерции роторов ВД, муфт и подвижных частей редуктора.

На рис. 29.13 приведена конструктивная схема двухдвигательного поступательного модуля с низкоскоростным ВД номинальной мощностью 3,75 кВт. Якорная обмотка каждого двигателя состоит из двух систем, каждая из которых подключена к своему коммутатору. Таким образом, в рассматриваемой конструкции реализовано четырехканальное управление, обеспечивающее высокую надежность привода. Для преобразования вращательного движения ВД в возвратно-поступательное перемещение штока, механически соединенного с исполнительным органом, использован шариковинтовой механизм (ШВМ), который обладает высоким КПД (до 98%) и высокой точиостью отработки команд в связи с высокой точностью изготовления деталей и отсутствием люфтов. Последнее позволяет осуществить позиционную отрицательную обратную связь в приводе путем использования сигналов *ДПР* вентильных двигателей. Высокий КПД шариковинтового механизма, выполняющего роль силового редуктора, значительно снижает тепловыделение в модуле и повышает его ресурс.

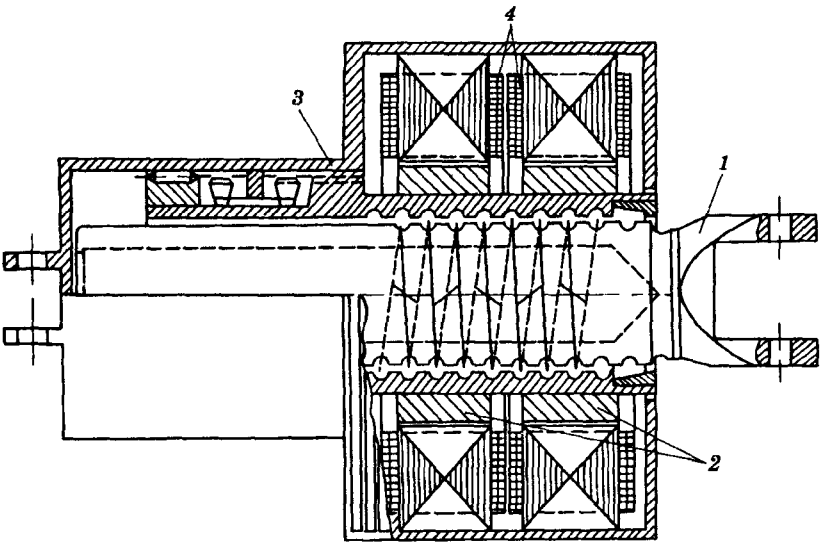


Рис. 29.13. Конструкция электромеханического модуля на базе вентильного двигателя
1 — выходной шток; 2 — постоянные магниты индуктора; 3 — ротор; 4 — якорные обмотки

Основные технические данные модуля следующие:

Максимальная скорость движения штока, мм/с	95
Максимальное тормозное усилие на штоке, Н	75 000
Длина перемещения штока, мм	180
Номинальная частота вращения ВД, об/мин	900
Номинальный вращающий момент, Н·м	40

В рассматриваемой конструкции гайка ШВМ одновременно выполняет функции ротора вентильных двигателей. Использование постоянных магнитов индукторов из материала $SmCo_5$ позволяет получить компактную конструкцию с высокими динамическими показателями благодаря исключению силового редуктора и муфт, что снижает момент инерции вращающихся частей.

Решение задачи обеспечения минимума массогабаритных показателей электромеханических модулей непосредственно связано с выбором структуры ВД, входящих в их состав. В современных электроприводах малой и средней мощности наибольшее распространение получили ВД с трехсекционными лучевыми обмотками и мостовыми коммутаторами. В таких ВД в каждый полупериод изменения ЭДС в секциях якорной обмотки коммутатор подключает каждую секцию к источнику постоянного напряжения. Тем самым устраняются пульсации тока в обмотке, обеспечивается минимум электрических потерь мощности в ней и высокий КПД двигателя.

ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЭТС1

Электропривод ЭТС1 предназначен для использования в механизмах подачи металлорежущих станков и других механизмах с аналогичными требованиями. Электроприводы выполнены на базе тиристорных преобразователей частоты с непосредственной связью с сетью и двухфазных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов с номинальными моментами от 47 до 170 Н·м.

Структурная схема электропривода ЭТС1 показана на рис. 29.14. В состав электропривода входят преобразователь *П*, синхронный двигатель *М* со встроенным комплексным датчиком *ПДФ-9* и встроенным тормозом (или без тормоза), автоматический выключатель *АВ*, токоограничивающий реактор (*Р1* и *Р2*) или силовой трансформатор. Основные технические данные электроприводов и электродвигателей приведены в табл. 29.15 и 29.16.

Электропривод обеспечивает диапазон регулирования не менее 10 000, полосу пропускания не менее 30 Гц, работу в длительном режиме с моментом $M_{ном}$ до скорости $0{,}25n_{max}$ с последующим снижением допустимого момента до $(0{,}5 \div 0{,}8)M_{ном}$ при скорости n_{max}. Перегрузка по току (моменту) не ме-

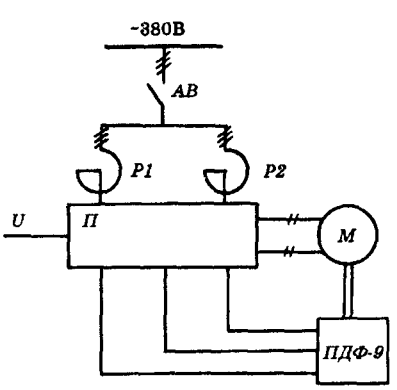


Рис. 29.14. Структурная схема электропривода ЭТС1

Таблица 29.15. Основные технические данные электроприводов ЭТС1

Тип электропривода	Номинальный ток преобразователя, А	Номинальный момент двигателя, Н·м	Максимальная частота вращения, об/мин	Тип двигателя
ЭТС1-01-3700	50	47	1500	4СФ2П132
	50	70	1500	4СФ2П132
	50	100	1500	4СФ2П160
ЭТС-10-14000	100	130	1500	4СФ2П160
	100	170	1500	4СФ2П180

сов шириной 180°, сдвинутых одна относительно другой на 90° и синхронизированных с фазными ЭДС статорных обмоток. ДУПР необходим для построения контура положения в следящих электроприводах, а также для формирования гармонических сигналов для тока и ЭДС. На выходе ДУПР формируются две последовательности высокочастотных импульсов (250 импульсов на оборот вала ротора), смещенных одна относительно другой на 90°, что позволяет получить информацию о направлении вращения ротора.

В электроприводе предусмотрены следующие виды защит с индивидуальной сигнализацией: максимальная токовая защита тиристоров и двигателя; от обрыва цепи тахогенератора; от снижения или исчезновения напряжения; от неправильного чередования фаз питающей сети; тепловая защита тиристоров, двигателя, токоограничивающих реакторов.

Таблица 29.16. Основные технические данные электродвигателей типа 4СФ2П

Тип двигателя	$M_{ном}$, Н·м	$I_{ном}$, А	ЭДС холостого хода, В (при 1500 об/мин)	Момент электромагнитного тормоза, Н·м	Момент инерции двигателя, кг·м^2	Активное сопротивление фазы обмотки, Ом
4СФ2П132	70	22,9	240	—	0,1	0,805
4СФ2П132Е	70	22,9	240	100	0,11	0,805
4СФ2П132	47	13,7	270	—	0,1	0,992
4СФ2П132Е	47	13,7	270	100	0,11	0,992
4СФ2П160	130	36,0	240	—	0,33	0,293
4СФ2П160Е	130	36,0	240	100	0,34	0,293
4СФ2П180	170	58,0	228	—	0,53	0,18
4СФ2П180Е	170	58,0	228	100	0,535	0,18

нее $2I_{ном}$ ($2M_{ном}$) до скорости $(0,5 \div 0,8)n_{max}$ с последующим уменьшением по линейному закону до $1,2I_{ном}$ ($1,2M_{ном}$) при скорости n_{max}. Двигатели снабжены узлом независимой вентиляции (кроме двигателей 4СФ2П132, где применено естественное охлаждение). Степень защиты двигателей IP44. Блоки тиристорных преобразователей имеют следующие размеры и массу при $I_{ном} = 50$ А: 240×340×420 мм, 26 кг; при $I_{ном} = 100$ А: 240×340×500 мм, 28 кг; блоки токоограничивающих реакторов имеют габаритные размеры 326×306×410 мм и массу 26 кг.

В силовую часть электропривода входит синхронный двигатель M, который имеет две гальванически не связанные обмотки, сдвинутые одна относительно другой на угол 90°. Применение двухфазного двигателя (вместо традиционного трехфазного) позволяет существенно упростить силовую часть и устройство управления преобразователем.

Тиристорный преобразователь частоты с непосредственной связью имеет естественную коммутацию тока и структурно реализован на базе двух реверсивных тиристорных преобразователей, каждый из которых выполнен по трехфазной мостовой схеме с раздельным управлением и подключен к соответствующей обмотке статора двигателя. Такое исполнение силовой части электропривода обеспечивает высокий КПД, сравнительно меньшую стоимость и хорошие массогабаритные показатели.

Комплексный датчик ПДФ-9 содержит бесконтактный тахогенератор постоянного тока и фотоимпульсные датчики углового положения ротора *ДПР* и угла поворота ротора (ДУПР). *ДПР* служит для получения информации о положении ротора относительно осей фазных обмоток статора. На выходе *ДПР* формируются две последовательности импульсов, сдвинутых одна относительно другой на 90° и синхронизированных с фазными ЭДС статорных обмоток. ДУПР необходим для построения контура положения в следящих электроприводах, а также для формирования гармонических сигналов для тока и ЭДС. На выходе ДУПР формируются две последовательности высокочастотных импульсов (250 импульсов на оборот вала ротора), смещенных одна относительно другой на 90°, что позволяет получить информацию о направлении вращения ротора.

Электропривод предусмотрены следующие виды защит с индивидуальной сигнализацией: максимальная токовая защита тиристоров и двигателя; от обрыва цепи тахогенератора; от снижения или исчезновения напряжения; от неправильного чередования фаз питающей сети; тепловая защита тиристоров, двигателя, токоограничивающих реакторов.

Электропривод имеет блокировку регулятора скорости, устраняющую ползучую скорость при отключенном задатчике; узел контроля соответствия частоты вращения двигателя заданной; блокировку готовности электропривода к работе.

Электропривод ЭТС1 с частотно-токовым управлением обеспечивает плавное регулирование скорости в указанном диапазоне и работу во всех четырех квадрантах механических характеристик аналогично электроприводу постоянного тока.

Б. ВЕНТИЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

29.8. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЕНТИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Вентильные генераторы (ВГ) используются в качестве основного источника электрической энергии системы электрооборудования постоянного тока автомобилей, тракторов, мотоциклов, термоэлектрических тяговых установок тепловозов, а также летательных аппаратов.

Как и вентильный двигатель, ВГ в большинстве случаев представляет собой собственно генератор, выпрямитель и электронный блок регулирования.

Вентильные автомобильные и мотоциклетные генераторы выполняют с неподвижным якорем и вращающимся индуктором с клювообразной магнитной системой и контактными кольцами для подвода то-

ка к обмотке возбуждения. Вентильные тракторные генераторы выполняют индукторными с одноименными полюсами. Большинство ВГ имеет трехфазную обмотку якоря, но выпускаются тракторные ВГ мощностью 1÷2 кВт в пятифазном исполнении. В тяговых установках тепловозов, мощных автомобильных установках и в летательных аппаратах широко применяются бесконтактные ВГ с вращающимися выпрямителями. Такие генераторы обладают хорошими массогабаритными показателями. При больших частотах вращения ($n \geq 3000$ об/мин) роторы ВГ могут иметь неявнополюсное исполнение, при меньших частотах — явнополюсное. Также хорошими показателями обладают ВГ с постоянными магнитами, особенно из редкоземельных материалов. Однако ВГ с постоянными магнитами должны, как правило, иметь управляемые вентили для регулирования выходного напряжения.

Бесконтактные ВГ с когтеобразными полюсами и внешнезамкнутым потоком применяются в установках с высокой частотой вращения ($n \geq 10\,000$ об/мин), работающих в тяжелых условиях. Благодаря высокой частоте вращения такие генераторы могут соединяться с газотурбинным приводом без промежуточного редуктора.

Бесконтактные ВГ с внутризамкнутым потоком, торцевые бесконтактные вентильные генераторы также находят применение. В некоторых случаях при $n \geq 12\,000$ об/мин используется индукторный генератор, обладающий простой конструкцией ротора.

Считаются перспективными ВГ на основе асинхронных генераторов, обеспечивающие питание базового асинхронного генератора реактивной мощностью за счет управляемого выпрямителя.

Требования к ВГ во многом определяются характером нагрузки, например активно-индуктивной или емкостной (генераторы для импульсной сварки, противообледенительных систем транспортных установок).

Удельные массы ВГ оцениваются по мощности выпрямленного тока и зависят от коэффициента использования генератора:

$$k_{\text{ис}} = \frac{P_{\text{ср.ц}}}{S_{\text{г}}},$$

где $P_{\text{ср.ц}}$ — среднециклическая мощность; $S_{\text{г}}$ — расчетная мощность генератора.

Для ВГ, работающего на емкостный накопитель с нерегулируемым зарядом, $k_{\text{ис}} = 0{,}4 \div 0{,}6$. Без учета массы выпрямителя удельная масса ВГ возрастает в $1/k_{\text{ис}}$ раз. В генераторах с неуправляемыми выпрямителями удельная масса возрастает на 10÷20% при мощностях до 100 кВт и на 3÷5% при мощностях свыше 100 кВт. При использовании управляемых выпрямителей удельная масса ВГ возрастает и определяется глубиной и точностью регулирования. Значительная часть массы установок с ВГ приходится на сглаживающий дроссель или емкостный фильтр в случае их использования.

29.9. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ БЕСКОНТАКТНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Бесконтактный генератор и объединенный с ним полупроводниковый выпрямитель (ПВ) должны быть согласованы. Если в качестве бесконтактного генератора применяется генератор с постоянными магнитами, то для регулирования и стабилизации выходного напряжения рационально использовать управляемый ПВ, схема которого должна предусматривать также быстрый сброс выходного напряжения при коротких замыканиях, поскольку магнитный поток генератора не может быть резко снижен. При использовании бесконтактного генератора с обмоткой возбуждения ПВ может быть неуправляемым или управляемым. В первом случае ПВ прост и надежен, а напряжение регулируется изменением тока в обмотке возбуждения. В аварийных режимах этот ток снижается до нуля (гашение поля возбуждения). Недостатком такого способа регулирования является невысокое быстродействие из-за больших постоянных времени цепи возбуждения. Во втором случае, когда используются управляемые ПВ, напряжение может регулироваться как током возбуждения, так и управлением ПВ, что увеличивает быстродействие, но существенно усложняет схему управления.

Основная специфика ВГ связана с использованием полупроводникового выпрямителя. Для выпрямления тока применяют многофазные ПВ с нулевым выводом (рис. 29.15, *а*) или мостовые ПВ на диодах или тиристорах (рис. 29.15, *б*). Из-за того, что в ВГ каждая фаза якорной обмотки работает с перерывами и переключение токов фаз на внешнюю цепь сопровождается процессами коммутации, его мощность снижается по сравнению с мощностью генератора переменного тока. Для схемы ПВ с нулевым выводом мощность ВГ и коэффициент его использования в 2 раза меньше, чем для схемы ПВ мостового типа. Характерной особенностью работы ВГ с регулируемым ПВ является выработка помимо активной и реактивной мощности. Это связано с тем, что увеличение угла управления вентилей вызывает большее смещение по фазе первой гармоники тока по отношению к напряжению генератора.

Для вентильных генераторов нашли также применение шестифазная схема ПВ с нулевым выводом (рис. 29.15, *в*) и сдвоенные мостовые схемы: последовательная (рис. 29.15, *г*) и параллельная (рис. 29.15, *д*), когда в генераторе имеются две трехфазные якорные обмотки, смещенные одна относительно другой на электрический угол 30°. При параллельном соединении мостовых выпрямителей обычно используется уравнительный реактор *УР* для сглаживания пульсаций тока и напряжения. Схемы ПВ характеризуются следующими показателями:

$k_{\text{ис max}}$ — максимальный коэффициент использования, определяющий предельное отношение реальной мощности к типовой расчетной мощности ВГ;

$k_{\text{п}(1)}$ — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по основной гармонике;

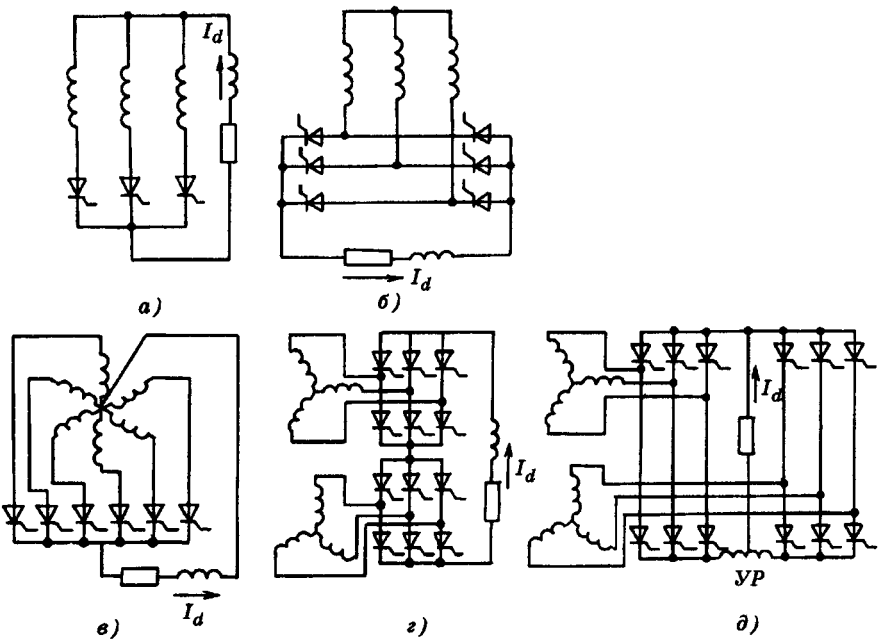


Рис. 29.15. Схемы выпрямителей для вентильных генераторов

Таблица 29.17

Схема ПВ	$k_{\text{нс max}}$	$k_{\text{п(1)}}$	$U_{\text{обр}}/U_d$	I_V/I_d
Трехфазная с нулевым выводом	0,676	0,25	2,1	0,33
Шестифазная с нулевым выводом	0,552	0,057	1,05	0,17
Трехфазная мостовая	0,955	0,057	1,05	0,33
Сдвоенные мостовые схемы:				
последовательная	0,955	0,0135	0,523	0,33
параллельная	0,955	0,0135	1,05	0,17

$U_{\text{обр}}/U_d$ — отношение максимального обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ на одном вентиле к среднему значению выпрямленного напряжения U_d;

I_V/I_d — отношение среднего тока вентиля I_V к среднему значению выпрямленного тока I_d.

Сопоставление различных схем по этим показателям при активно-индуктивной нагрузке дано в табл. 29.17.

Трехфазная схема с нулевым выводом имеет наименьшее число вентилей, но пониженное использование и высокий уровень пульсаций выпрямленного напряжения.

Достоинствами шестифазной схемы с нулевым выводом являются пониженная нагрузка вентилей и конструктивное удобство их размещения.

Трехфазная мостовая схема обеспечивает высокое использование генератора, хорошее качество напряжения, низкие обратные напряжения на вентилях. Эта схема получила наибольшее распространение.

Сдвоенные мостовые схемы позволяют получить минимальный уровень пульсаций выходного напряжения, но содержат две якорные обмотки и большое число вентилей.

Иногда для ВГ используются пятифазные мостовые схемы, обеспечивающие низкий уровень пульсаций выпрямленного напряжения, а также двойные трехфазные схемы с общим нулевым выводом и уравнительным реактором.

В мощных ВГ применяется групповое включение вентилей. Для выравнивания нагрузок вентилей используют специальные шунтирующие цепи с резисторами, стабилитронами или индуктивными делителями (с магнитной связью или без нее). Для сглаживания пульсаций напряжения в ВГ часто применяются простой индуктивный фильтр в виде дросселя, а также емкостный фильтр (при повышенных напряжениях) или индуктивно-емкостные Г- и П-образные фильтры.

Особые требования к ВГ, работающим на активно-индуктивную нагрузку, связаны с необходимостью иметь в них низкие значения коммутационного сопротивления $x_{\text{к}}$ (соответственно x''_d), поскольку при больших $x_{\text{к}}$ снижается выходное напряжение и сильно искажаются формы кривых напряжений и токов генератора. Поэтому при больших $x_{\text{к}}$ увеличивают расчетную мощность генератора на 15÷20%, кроме того при этом возникают большие перенапряжения на вентилях. Для снижения $x_{\text{к}}$ в ВГ приходится использовать более мощную демпферную систему, чем в обычных синхронных генераторах. По тем же причинам ВГ должны иметь несколько пониженную линейную нагрузку. С целью уменьшения изменений выпрямленного напряжения обычно стремятся снизить влияние реакции якоря ВГ, для чего помимо уменьшения линейной нагрузки увеличивают число полюсов. Обычно в ВГ число полюсов от 8 до 10. Большое число полюсов

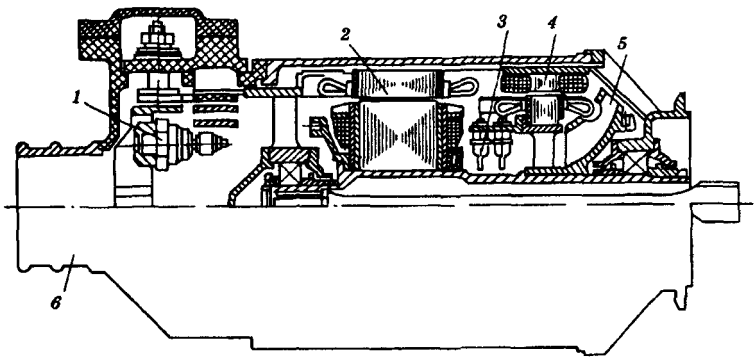


Рис. 29.16. Конструкция бесконтактного ВГ с вращающимися выпрямителями

обеспечивает, как правило, повышенную частоту ЭДС обмотки якоря ВГ, что повышает частоту пульсаций выпрямленного напряжения, облегчая фильтрацию высших гармоник и улучшая качество выпрямленного тока.

Наилучшие показатели имеют бесконтактные синхронные вентильные генераторы с вращающимися выпрямителями. Такие генераторы обладают малыми полями рассеяния (соответственно малыми $x_к$) и хорошими массогабаритными показателями. При больших частотах вращения ($n \geq 3000$ об/мин) роторы могут выполняться неявнополюсными в виде сплошного стального цилиндра с пазами для обмотки возбуждения. Массивный ротор обеспечивает генератору хорошие демпфирующие свойства по продольной и поперечной осям. При небольших частотах вращения ротор выполняют явнополюсным с развитой демпферной клеткой.

Конструкция ВГ показана на рис. 29.16. Вентили *1* выпрямителя ПВ размещаются на радиаторах со стороны входного воздушного патрубка *6*. Под действием напора, создаваемого в воздухозаборниках или с помощью центробежного вентилятора *5*, охлаждающий воздух подается последовательно на вентили *1*, основной генератор *2*, блок вращающихся выпрямителей *3* и возбудитель *4*, а затем выбрасывается наружу. Относительная масса генератора при мощностях 20÷30 кВт и $n = 4500 \div 9000$ об/мин составляет 1,3÷1,4 кг/кВт.

Вентильные генераторы на основе синхронных генераторов с постоянными магнитами, особенно с магнитами из редкоземельных элементов, также обладают хорошими показателями. Достоинство таких ВГ — возможность обеспечения малых значений $x_к$ без развитых демпферных обмоток, поскольку магнитная проводимость постоянных магнитов по оси *d* низкая.

29.10. АВТОМОБИЛЬНЫЕ, МОТОЦИКЛЕТНЫЕ И ТРАКТОРНЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Вентильные автомобильные и мотоциклетные генераторы кроме выпрямителя снабжены регуляторами напряжения различных типов. На рис. 29.17 представлена схема генераторной установки автомобиля ВАЗ-2108. Установка состоит из собственно генератора, выпрямителя и регулятора напряжения.

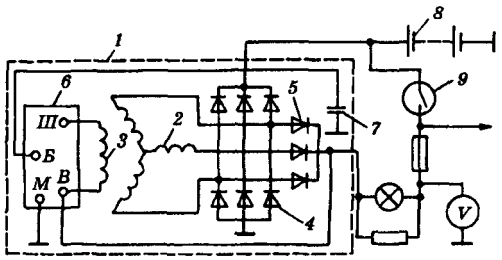


Рис. 29.17. Схема генераторной установки автомобиля ВАЗ-2108

1 — генераторная установка; *2* — обмотка статора; *3* — обмотка возбуждения; *4* — силовой выпрямитель; *5* — выпрямитель обмотки возбуждения; *6* — регулятор напряжения (*Б*, *В*, *М*, *Ш* — выводы регулятора); *7* — конденсатор подавления радиопомех; *8* — аккумуляторная батарея; *9* — замок-выключатель

Силовой выпрямитель дополнен тремя диодами выпрямителя обмотки возбуждения, что предотвращает возможность разряда аккумуляторной батареи на обмотку возбуждения при неработающем двигателе автомобиля. Выходной транзистор регулятора напряжения работает в ключевом режиме, изменяя ток в обмотке возбуждения так, чтобы напряжение генераторной установки оставалось практически неизменным при всех частотах вращения и нагрузках. Технические данные основных типов выпрямительных блоков приведены в табл. 29.18.

Типовая конструкция автомобильного ВГ представлена на рис. 29.18. Статор набирается из листов электротехнической стали толщиной 0,5÷1 мм. Число пазов статора у автомобильных генераторов может составлять 18, 36 и 72. Обмотка выполняется как катушечной ($q = 0{,}5$), так и распределенной ($q = 1; 2$). Фланцы с клювами образуют магнитную систему индуктора с шестью парами полюсов. Встречаются конструкции, у которых втулка, разъединенная по длине на две части, изготовляется заодно с фланцами. Контактные кольца с пластмассовой арматурой напрессованы на вал. Крышки, отлитые из алюминиевого сплава, имеют вентиляционные отверстия. В крышках размещены шарикоподшипники с одноразовой смазкой. На задней крышке закреплены пластмассовый коробчатый щеткодержатель, выводные болты и выпрямительный блок, состоящий из кремниевых диодов и теплоотводов.

У генераторов, имеющих встроенный регулятор напряжения, он закреплен на щеткодержателе. Для

Таблица 29.18. Технические данные выпрямительных блоков

Тип блока	Тип генератора	Напряжение, В	Максимальный выпрямленный ток, А	Максимальное обратное напряжение, В	Число фаз	Число диодов
БПВ 650	Г221, Г222	14	50	150	3	6
БПВ 4-45	Г250, 17.3701	14 или 28	45	150	3	6
БПВ 8-100	Г286, Г289	14 или 28	100 или 50	150	5	12
ВБГ 2А	Г502А, Г424	14	35	100	3	6
БПВ 30	Г306, 13.3701	14	30	100	3	6
БПВ 12-100	15.3701	14	100	150	3	13
БПВ 11-60	37.3701, 54.3701	14	60	150	3	9

автомобильных ВГ применяются обычно щетки марок М1А и ЭГ51А.

Мотоциклетные ВГ выпускаются двух типов: Г424 для тяжелых мотоциклов с объемом цилиндров 650÷750 см^3 и 28.3701 для средних мотоциклов с объемом цилиндров 250÷350 см^3. Мотоциклетные ВГ имеют магнитную систему, аналогичную системе автомобильных ВГ, но отличаются от них отсутствием протяжной вентиляции. Генератор Г424 имеет фланцевое крепление, выносной регулятор напряжения, встроенный выпрямительный блок, охлаждаемый собственным вентилятором, расположенным на валу генератора. Другие узлы генератора охлаждаются встречным потоком воздуха при движении мотоцикла. У генератора 28.3701 ротор консольной конструкции закреплен на валу двигателя мотоцикла. Генератор работает в комплекте с вынесенным блоком БПВ 14-10, совмещающим в себе трехфазный мостовой выпрямитель и тиристорный регулятор напряжения.

Вентильные тракторные генераторы изготовляются в бесконтактном исполнении. Они представляют собой одноименнополюсную индукторную машину с аксиальным магнитным потоком. На рис. 29.19 представлена конструкция тракторного ВГ типа 13.3701. Статор в принципе не отличается от статора автомобильного ВГ, но он имеет только открытые пазы. Ротор выполнен в виде шестилучевой звездочки, пакет которой набран из стальных пластин толщиной 0,5÷1 мм. В передней крышке, изготовленной из магнитомягкого материала (сталь 08Ю), размещен индуктор, состоящий из стального фланца и втулки, на которую надет каркас обмотки возбуждения.

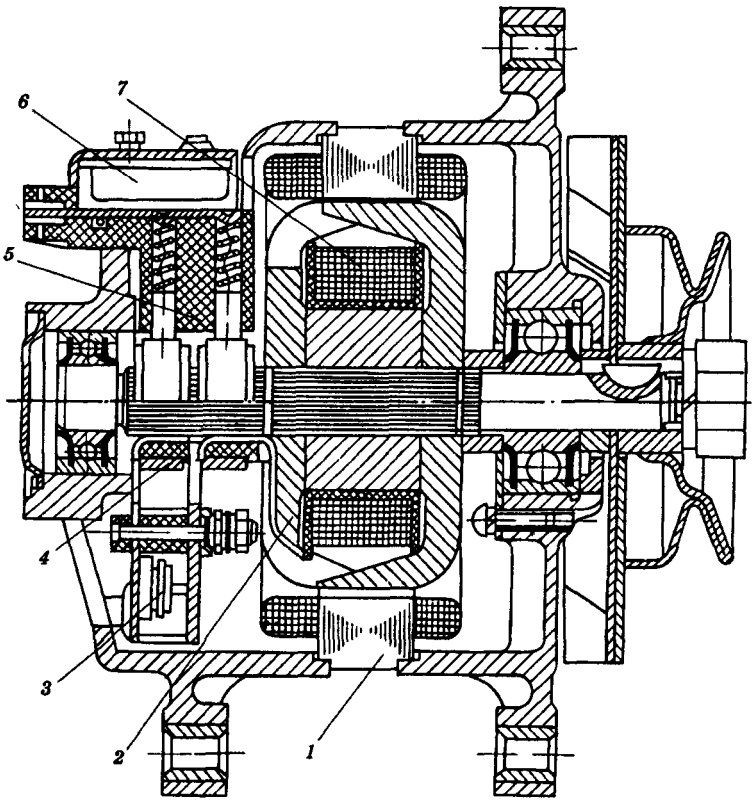


Рис. 29.18. Автомобильный вентильный генератор 29.3701

1 — статор; *2* — фланцы с клювами; *3* — выпрямитель; *4* — контактные кольца; *5* — щеткодержатель со щетками; *6* — регулятор напряжения; *7* — обмотка возбуждения

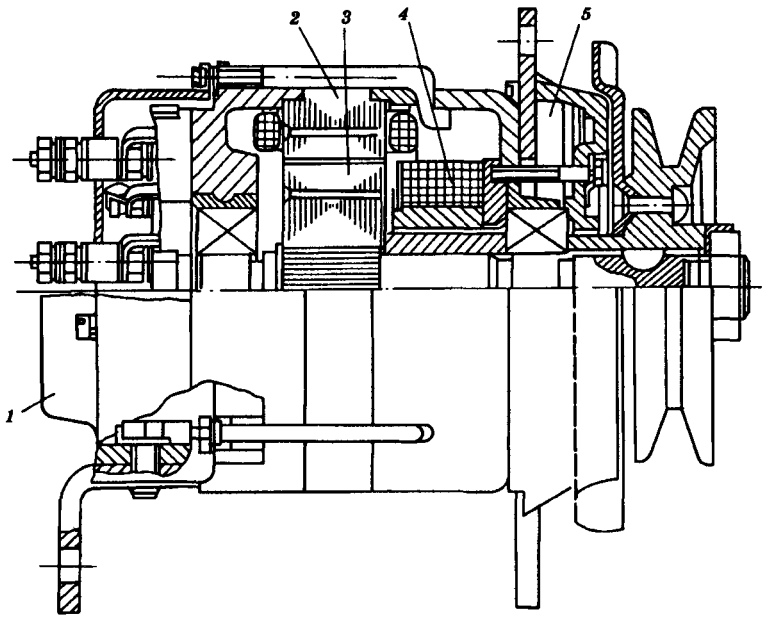


Рис. 29.19. Тракторный вентильный генератор
1 — блок регулятора; *2* — статор; *3* — ротор; *4* — обмотка возбуждения; *5* — выпрямительный блок

Задняя крышка из алюминиевого сплава несет на себе блок БПВ 13-3, содержащий регулятор напряжения и выпрямитель обмотки возбуждения. Силовой выпрямитель БПВ 30 расположен на передней крышке. В вентильных генераторах, работающих с вынесенным регулятором напряжения (Г306), блок БПВ 13-3 отсутствует.

Генераторы мощностью 1 кВт и более (15.3701, 12.3701, 11.3701) имеют магнитную систему, аналогичную генератору 13.3701. Пятифазное исполнение ВГ позволяет снизить уровень пульсаций выпрямленного напряжения и применить в выпрямительных блоках тракторных ВГ всех типов мощностью от 400 до 2000 Вт унифицированный выпрямительный элемент — диод Д104.

Выпрямительный блок тракторного ВГ мощностью 1 кВт и более закреплен на задней крышке и охлаждается собственным центробежным вентилятором, установленным на валу генератора.

Генератор 46.3701 (аналогичный ему по конструкции генератор 54.3701 работает в комплекте с вынесенным регулятором напряжения РР362Б1) отличается от других типов тракторных ВГ наличием внутренней осевой вентиляции по типу автомобильного ВГ, а также смешанным магнитоэлектромагнитным возбуждением. Шесть изотропных магнитов из феррита бария, залитых алюминиевым сплавом в когтеобразную конструкцию, фланец которой при сборке ротора закрепляется на валу генератора, располагаются между зубцами ротора. Выпрямительный блок, так же как у автомобильного ВГ, закреплен во внутренней полости генератора, а регулятор напряжения — на его задней крышке. Пластмассовая крышка с отверстиями защищает узел регулятора напряжения от повреждений и препятствует проникновению во внутреннюю полость генератора частиц пыли. Технические данные автомобильных, мотоциклетных и тракторных ВГ приведены в табл. 29.19.

Таблица 29.19. Технические данные вентильных генераторов

Тип генератора	Применение	Тип регулятора напряжения	Максимальная мощность, Вт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Частота вращения при номинальном токе, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
			Автомобильные ВГ				
Г502А	"Запорожец"	РР310Б	360	12,5	30	5000	7 500
Г250А, Б, В, Г, Д, Е, Н, Ж, И	"Москвич", "Волга" ГАЗ-54, ЗИЛ-130	РР350	500	12,5	40	5000	8000÷10000
Г221	ВАЗ-2101, ВАЗ-2102, ВАЗ-2111	РР380	600	14	42	5000	13 600
Г222	ВАЗ-2104, ВАЗ-2105, ВА-32107	Я112В	700	14	50	5000	13 600
37.3701	ВАЗ-2108	17.3702	770	14	55	5000	13 600
16.3701	"Волга" ГАЗ-3102	13.3702	900	14	65	5000	9 600
29.3701	"Москвич-2140"	Я112А	700	14	50	5000	9 600
Г266А, Б, В, Г	Автобусы ПАЗ-672, КАВЗ-685	Я112А	840	14	60	5000	6400

Окончание табл. 29.19

Тип генератора	Применение	Тип регулятора напряжения	Максимальная мощность, Вт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Частота вращения при номинальном токе, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
			Автомобильные ВГ				
Г286А, В	Автобусы ЛАЗ-695, ЛиАЗ-677	Я112А	1100	14	80	5000	6 400
Г273А, Б	МАЗ-500А, КамАЗ-5320	Я120	780	28	28	5000	8 000
Г289	Автобус ЛАЗ-4202	Я120	2200	28	80	5000	6 400
Г263	БелАЗ-540А	РР363	4200	28	150	5000	6 400
32.3701	ЗИЛ-130М	РР350А	840	14	60	5000	8 000
17.3701	ЗИЛ-130К	Я112А	560	14	40	5000	8 000
			Мотоциклетные ВГ				
Г424	Тяжелые мотоциклы	РР330	200	14	10,7	2400	9 000
28.3701	Средние мотоциклы	БПВ14-10	112	14	8	1950	7 000
			Тракторные ВГ				
Г306Б, В, Г, Д, Ж, И, К	Тракторы класса 0,6-2 тс	РР362Б	450	14	28	3600	4 700
13.3701	Тракторы класса 0,6-2 тс	Я112Б	450	14	28	3600	4 700
46.3701	Тракторы класса 0,6-2 тс	Я112Б	780	14	50	5000	6 000
Г287Д, Е	Тракторы К700, К701	РР385Б	1200	14	85	5000	8 000
15.3701	Тракторы Т150К, ТТ4, комбайны	Я112Б	1260	14	72	4500	6 000
12.3701	Трактор Т130	РР356Б	1260	28	36	4500	6 000
11.3701	Трактор Т330	РР356Б	2700	28	72	3000	4 000

Примечание. Все регуляторы напряжения, за исключением регуляторов типа РР, располагаются в генераторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

29.1. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1990.

29.2. **Справочник** по электрическим машинам. Т. 2 / Под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1989.

29.3. **Копылов И.П.** Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986.

29.4. **Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В.** Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

29.5. **Василевский В.И., Купеев Ю.А.** Автомобильные генераторы. М.: Транспорт, 1978.

29.6. **Moham N., Undeland T.M., Robbins W.P.** Power Electronics Converter Applications and Design Wiley, 1989.

29.7. **Справочник** по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ и И.В. Антика. М.: Энергоатомиздат, 1983.

29.8. **Цаценкин В.К.** Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательство МЭИ, 1991.

29.9. **Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С. Р.** Специальные электрические машины. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1993.

29.10. **Лебедев А.С., Остриров В.Н., Садовский Л.А.** Электроприводы для станков и промышленных роботов. М.: Издательство МЭИ, 1991.

29.11. **Справочник** по бесконтактным моментным электродвигателям серии ДБМ. М.: Товарищество "МЭЛМА", 1992.

29.12. **Транзисторный** электропривод на базе синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов для станков и промышленных роботов / А.Д. Поздеев, В.В. Горчаков, Н.В. Донской и др. // Электротехника. 1988. № 2. С. 10—14.

29.13. **Тиристорные** электроприводы серии ЭТС с синхронными двигателями / В.В. Горчаков, М.И. Альтшуллер, А.А. Сушенков и др. // Электротехника. 1988. N° 2. С. 14—17.

29.14. Комплектные системы управления электроприводами тяжелых металлорежущих станков / Под ред. А.Д. Поздеева. М.: Энергия, 1980.

29.15. **Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В.** Следящие электроприводы станков с ЧПУ. М.: Энергоатомиздат, 1988.

29.16. **Малюк Н.Т.** Типовые электроприводы металлорежущих станков и промышленных роботов. Чебоксары: Чувашск. гос. ун-т, 1987.

29.17. **Черков Е.А., Кузьмин В.П.** Комплектные электроприводы станков с ЧПУ. Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1989.

29.18. **Датчики** положения ротора и синхронные тахогенераторы для бесконтактного моментного привода / С.А. Батоврин, Л.Н. Епифанова, А.Г. Никеров и др. // Электротехника. 1991. N° 9. С. 52—55.

29.19. **Синтез** и оптимизация роторов из высококоэрцитивных постоянных магнитов и систем для намагничивания / А.И. Гриднев, Н.А. Келин, Н.И. Клевец и др. // Изд. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1987. N° 6.

29.20. **Исследование** моментных двигателей с многополюсной магнитной системой ротора с тангенциально-радиальным намагничиванием / Ю.М. Беленький, О.В. Хоменко, Т.В. Шишкина // Электротехника. 1989. N° 10. С. 6—9.

Раздел 30

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИЛОВЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

СОДЕРЖАНИЕ

30.1. Исполнительные двигатели 268
Общие сведения (268). Асинхронные исполнительные двигатели (268). Исполнительные двигатели постоянного тока (269). Шаговые исполнительные двигатели (271).
30.2. Тахогенераторы 273
Общие сведения (273). Асинхронные тахогенераторы (273). Тахогенераторы постоянного тока (274). Синхронные тахогенераторы (275).
30.3. Сельсины 275
Общие сведения (275). Индикаторный режим работы (276). Трансформаторный режим работы (277). Дифференциальные сельсины (277).
30.4. Вращающиеся трансформаторы 277
Общие сведения (277). Вращающиеся трансформаторы для счетно-решающих устройств (278). Вращающиеся трансформаторы для систем дистанционных передач (279). ВТ-построители (279).
30.5. Асинхронные микродвигатели 280
Общие сведения (280). Трехфазные двигатели (280). Однофазные двигатели (280). Универсальные асинхронные двигатели (282).
30.6. Синхронные микродвигатели 283
Общие сведения (283). Двигатели с постоянными магнитами (283). Реактивные двигатели (284). Гистерезисные двигатели (285).
30.7. Тихоходные синхронные микродвигатели 286
Общие сведения (286). Многополюсные двигатели (286). Двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения (286). Двигатели с катящимися и волновыми роторами (288).
30.8. Коллекторные микродвигатели 288
Общие сведения (288). Двигатели постоянного тока (289). Двигатели переменного тока (289). Универсальные коллекторные двигатели (290).
Список литературы 290

30.1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Исполнительными двигателями (ИД) называются управляемые электрические машины, преобразующие электрический сигнал в пропорциональное ему механическое перемещение вала. Для работы ИД характерны частые пуски, остановки, реверсы, т. е. они практически не работают в номинальном режиме. Поэтому ИД никогда не снабжаются вентиляторами. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых почти постоянно находятся ИД, их стремятся выполнить малоинерционными.

Требования, предъявляемые к ИД, определяются спецификой их работы в схемах автоматики. Основными из них являются: отсутствие самохода — самоторможение двигателя при снятии сигнала управления; линейность механических и регулировочных характеристик; широкий диапазон регулирования частоты вращения; устойчивая работа во всем диапазоне частот вращения двигательного режима; большой пусковой момент; малая мощность управления; высокое быстродействие; малое напряжение трогания; работоспособность при заданных климатических условиях и механических нагрузках.

АСИНХРОННЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронные исполнительные двигатели (АИД) имеют на статоре две обмотки, сдвинутые в пространстве, в большинстве случаев, на электрический угол 90°. Одна из них постоянно находится под напряжением и называется обмоткой возбуждения. На другую — обмотку управления — электрический сигнал подается тогда, когда необходимо вращение вала. Необходимый для работы двигателя сдвиг токов в обмотках во времени достигается при помощи различного рода фазосдвигающих устройств. Управление АИД осуществляется в основном либо путем изменения амплитуды напряжения управления — амплитудное управление, либо путем изменения его фазы — фазовое управление, либо путем одновременного изменения амплитуды и фазы — амплитудно-фазовое управление. Независимо от способа управления регулирование частоты вращения происходит за счет изменения степени эллиптичности магнитного поля от кругового до пульсирующего. При эллиптическом поле, кроме вращающего момента, образуется тормозной момент и частота вращения двигателя снижается. При пульсирующем поле ротор самотормозится. Значительно реже применяются и другие способы управления: изменение пространственного сдвига осей обмоток,

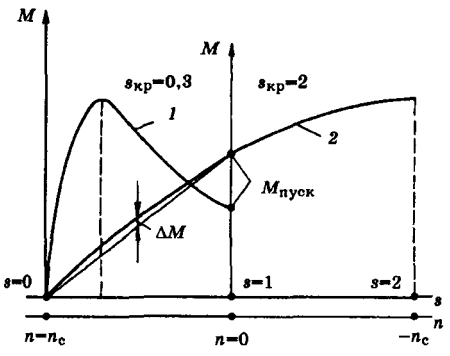


Рис. 30.1. Механические характеристики обычного (*1*) и исполнительного (*2*) асинхронных двигателей

подмагничивание постоянным током, широтно-импульсное управление и др.

С целью обеспечения большинства предъявляемых к ИД требований АИД в отличие от обычных асинхронных двигателей выполняются с роторами, имеющими большое активное сопротивление. Это сопротивление выбирают таким, чтобы обеспечить критическое скольжение $s_{кр} = 2 \div 5$. На рис. 30.1 показаны механические характеристики $M = f(s)$ ($s = \dfrac{n_c - n}{n_c}$, где n_c — синхронная частота вращения поля) или $M = f(n)$ при $U = \text{const}$ обычного и исполнительного асинхронных двигателей. С увеличением $s_{кр}$ нелинейность механнческой характеристики ΔM уменьшается. Но чем больше $s_{кр}$, тем меньше мощность на валу двигателя и его КПД. Поэтому номинальная мощность АИД примерно в 2÷3 раза меньше номинальной мощности обычного двигателя при одннаковых габаритах. Нелинейность механической характеристики существующих АИД $\Delta M/M_{пуск}$ колеблется в пределах 0,04÷0,58. Меньшие значения относятся к прецизионным двигателям с фазовым управлением, большие — к конденсаторным АИД с амплитудно-фазовым управлением.

Регулировочные характеристики АИД (зависимость частоты вращения от напряжения управления при постоянной нагрузке) $n = f(U_y)$ нелинейны при всех способах управления. Нелинейность регулировочных характеристик снижают искусственно при их калибровке за счет уменьшения зоны изменения управляющего сигнала. Поскольку любой двигатель имеет собственный момент сопротивления, то необходим минимальный сигиал управления (напряжение трогания $U_т$) для приведения ротора во вращение. Чувствительность современных АИД $U_т/U_{у.ном}$ составляет 0,01÷0,08. Хотя АИД работают в основном в переходных режимах, условно вводят понятия номинальных мощности и частоты вращения. На практике обычно за номинальную мощность АИД принимают максимальную мощность на валу при сигнале управления, обеспечивающем круговое магнитное поле. Соответствующая этой мощности номинальная частота вращения обычно несколько превосходит половину частоты вращения холостого хода. Быстродействие АИД характеризуется электромеханической постоянной времени $T_м = \pi J_р n_х/(30 M_{пуск})$, где $J_р$ — момент инерции ротора, кг·м^2; $n_х$ — частота вращения холостого хода, об/мин; $M_{пуск}$ — пусковой момент, Н·м. Физически $T_м$ равна времени разгона ненагруженного двигателя от момента включения обмотки управления до момента достижения ротором частоты вращения, равной $0{,}633 n_х$. В современных АИД $T_м$ колеблется в широких пределах — от 10 до 660 мс. Меньшие значения соответствуют более тихоходным двигателям. В целях уменьшения габаритов и массы большинство АИД рассчитываются на работу от источников с повышенной частотой $f = 400 \div 1000$ Гц.

По конструкции ротора серийно выпускаемые АИД разделяют на двигатели с обычным короткозамкнутым ротором, имеющим обмотку типа "беличья клетка", и двигатели с полым немагнитным ротором. Конструктивная схема АИД с полым немагнитным ротором показана на рис. 30.2. Ротор изготавливают из сплавов алюминия в виде стакана толщиной 0,2÷1 мм. Внутренний статор служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути рабочего потока. Достоинствами такой конструкции являются: малый момент инерции ротора, хорошее быстродействие, отсутствие сил радиального тяжения, бесшумность хода, высокая чувствительность. Недостатками — большой немагнитный зазор, значительный намагничивающий ток, низкие коэффициент мощности и КПД.

В табл. 30.1 приведены основные выходные показатели наиболее распространенных серий АИД. На базе двигателей серий ДИД, АД, ДМ выпускаются тахометрические агрегаты ДГ, АДТ, АГМ, содержащие на одном валу двигатель и асинхронный тахогенератор. Некоторые АИД могут выполняться с электромагнитными или инерционными демпферами. Большинство серий АИД имеют еще и встроенные понижающие механические редукторы.

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По принципу действия исполнительные двигатели постоянного тока (ИДПТ) аналогичны обычным

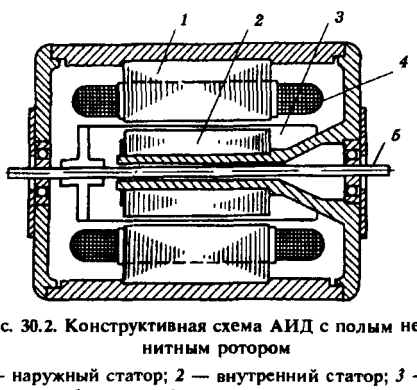


Рис. 30.2. Конструктивная схема АИД с полым немагнитным ротором

1 — наружный статор; *2* — внутренний статор; *3* — ротор; *4* — обмотки возбуждения и управления; *5* — вал

Таблица 30.1. Основные технические данные серий АИД

Тип двигателя	f, Гц	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	n_x, 10^3 об/мин	$M_{пуск}$, мН·м	$J_р$, 10^{-7} кг·м^2	$T_м$, мс	КПД, %	Масса, кг
Ротор типа "беличья клетка"									
ДКИ	50÷400	0,6÷40	0,8÷9	1,2÷10	2,4÷186	0,5÷147	8÷50	12÷50	0,08÷2,36
АД	400÷1000	1÷4,5	3÷12	4,5÷16	3,2÷21	1÷6	10÷50	18÷20	0,08÷0,56
ДМ	400	0,04÷2,5	2,8÷5,6	5,5÷8,5	0,25÷10	0,4÷6	24÷66	—	0,02÷0,33
ДКМ	400	0,16÷40	4÷8	—	0,7÷60	0,2÷530	15÷150	—	0,04÷2,2
АСМ	50	0,67÷4,6	1,1÷1,3	—	22÷80	17÷39	45÷88	—	0,72÷1,9
Ротор полый немагнитный									
ДИД	400÷1000	0,1÷5	4,6÷12	8÷20	0,22÷22	0,3÷25	25÷160	3÷23	0,03÷0,72
ЭМ	400	0,2÷25	2÷6	4÷7,8	2÷90	0,7÷120	15÷100	2÷23	0,17÷2,8
АДП	50÷500	2,4÷62	1,8÷6	2,5÷10	8÷170	7,8÷120	5÷87	7,5÷34	0,7÷5,7

двигателям постоянного тока с независимым возбуждением (см. разд. 28). При электромагнитном способе возбуждения в качестве обмотки управления могут использоваться либо обмотка якоря — якорное управление, либо обмотка возбуждения — полюсное управление. Полюсное управление в связи с нелинейностью и неоднозначностью регулировочных характеристик применяется крайне редко. В двигателях с возбуждением от постоянных магнитов такой способ управления в принципе неприменим.

В отличие от АИД механические и регулировочные характеристики ИДПТ при якорном управлении теоретически линейны (рис. 30.3). К достоинствам ИДПТ можно отнести также большой пусковой момент, высокий КПД, в 2÷3 раза меньшие габариты и массы, чем у АИД той же мощности. Основным недостатком ИДПТ является наличие скользящих контактов — коллектора и щеток, что уменьшает стабильность характеристик, снижает надежность, приводит к излучению радиопомех, требует периодического контроля двигателей. По способу возбуждения ИДПТ разделяют на двигатели с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов; по конструкции якоря — на двигатели с обычным (пазовым) якорем, с гладким (беспазовым) якорем и малоинерционные двигатели с цилиндрическим полым якорем или с дисковым якорем. Особенностью всех ИДПТ является то, что для исключения влияния реакции

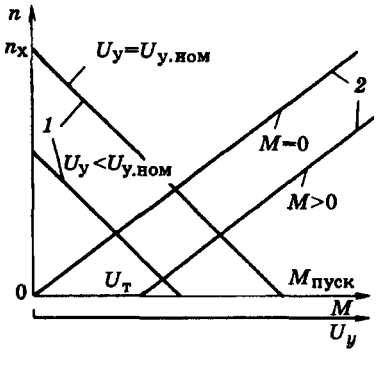


Рис. 30.3. Механические (*1*) и регулировочные (*2*) характеристики ИДПТ при якорном управлении

якоря на основные характеристики они выполняются с ненасыщенной магнитной системой.

Исполнительные двигатели с электромагнитным возбуждением и пазовым якорем по конструкции отличаются от силовых двигателей постоянного тока общего применения лишь тем, что имеют шихтованные — набранные из листов электротехнической стали, не только якорь, но и спинку статора и полюсы. Это необходимо для уменьшения потерь от вихревых токов при работе двигателей в переходных режимах. Электромеханическая постоянная времени двигателей с электромагнитным возбуждением колеблется от 30 до 200 мс. Наиболее распространенными сериями таких двигателей являются серии СЛ, СД, МИ, ПБС, ДВИ и др.

Исполнительные двигатели с постоянными магнитами и пазовым якорем не имеют обмотки возбуждения и, следовательно, потерь на возбуждение. Вследствие этого они обладают более высоким КПД, меньшими габаритами и массой. Конструкция наиболее распространенной серии таких двигателей — серии ДПМ, показана на рис. 30.4. Электромеханическая постоянная времени двигателей с постоянными магнитами и пазовым якорем колеблется от 30 до 100 мс.

В двигателях с беспазовым якорем его обмотка располагается непосредственно на гладкой поверхности ротора. Крепление обмотки осуществляется при помощи бандажей и клея — компаунда. При такой конструкции снижается индуктивность обмотки якоря, улучшается коммутация, уменьшается электромеханическая постоянная времени ($T_м$ < <100 мс). Недостатком ИДПТ с беспазовым якорем является наличие большого немагнитного промежутка на пути потока возбуждения, складывающегося из рабочего зазора и толщины обмотки ротора. Наиболее распространенной серией ИДПТ с беспазовым якорем является серия МИГ.

Недостатком рассмотренных выше ИДПТ является большой момент инерции ротора, магнитопровод которого набирается из листов электротехнической стали. С целью устранения этого недостатка разработаны малоинерционные ИДПТ, не содержащие на роторе стального магнитопровода. В зависимости от конструкции ротора такие ИДПТ разделяются на двигатели с цилиндрическим и с дисковым

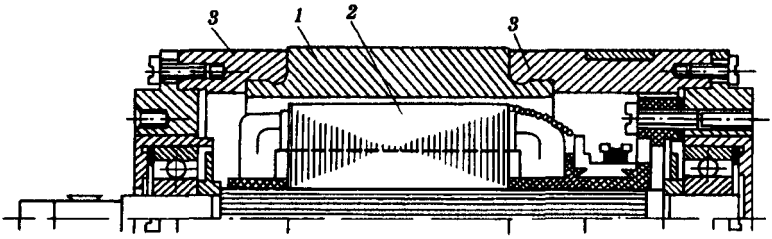


Рис. 30.4. Двигатель серии ДПМ
1 — постоянный магнит; *2* — пазовый якорь; *3* — корпус

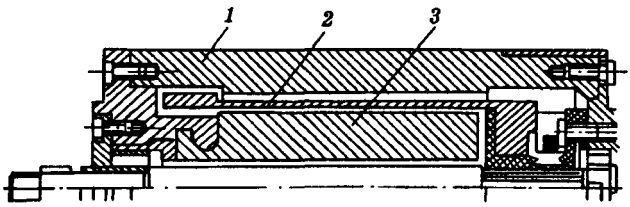


Рис. 30.5. Двигатель серии ДПР с полым цилиндрическим якорем
1 — станина; *2* — полый якорь; *3* — постоянный магнит

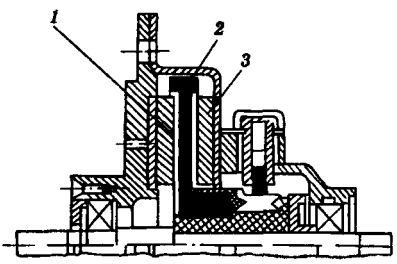


Рис. 30.6. Двигатель с дисковым якорем серии ДПР13
1 — постоянный магнит; *2* — дисковый якорь с обычной обмоткой; *3* — кольцевой магнитопровод

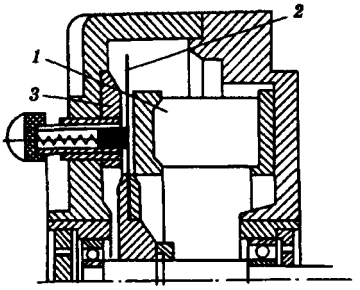


Рис. 30.7. Двигатель с дисковым якорем серии ПЯ
1 — постоянный магнит; *2* — дисковый якорь с печатной обмоткой; *3* — кольцевой магнитопровод

якорями. В зависимости от технологии малоинерционные якоря изготовляют с обмоткой обычного типа, выполненной из изолированных и скрепленных эпоксидными смолами проводников, и с печатной обмоткой, наносимой электрохимическим путем на полый цилиндр или диск из изоляционного материала. При обычной обмотке концы секций якоря присоединяются к пластинам укрепляемого на валу коллектора; при печатной обмотке щетки, как правило, скользят непосредственно по проводникам. Двигатели с полым цилиндрическим якорем (рис. 30.5) по своей конструкции напоминают АИД с полым немагнитным ротором. Двигатели с дисковым якорем (рис. 30.6, 30.7) — это двигатели торцевого типа, в которых создаваемый постоянными магнитами поток возбуждения направлен аксиально.

Достоинствами малоинерционных ИДПТ с немагнитными роторами являются: отсутствие потерь в стали, незначительное влияние реакции якоря, малая индуктивность обмотки якоря и как следствие практически безыскровая коммутация, малые механические потери. Небольшой момент инерции якоря в таких двигателвх способствует повышению их быстродействия. Электромеханическая постоянная времени ИДПТ с ротором, содержащим коллектор, составляет 15÷20, с бесколлекторным ротором — 5÷ 15 мс.

Основные технические данные наиболее распространенных серий ИДПТ приведены в табл. 30.2. Некоторые двигатели указанных серий могут выпускаться со встроенными тахогенераторами и механическими редукторами.

Иногда в качестве ИДПТ используются вентильные двигатели, в которых щеточно-коллекторный узел заменен управляемым полупроводниковым коммутатором (см. разд. 29).

ШАГОВЫЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Шаговые исполнительные двигатели (ШИД) — электрические машины, преобразующие импульсные электрические сигналы в пропорциональное числу этих сигналов дискретное механическое перемещение ротора с последующей фиксацией его положеиия.

Для питаиия ШИД примеияются специальные блоки управления, которые преобразуют входной сигнал в многофазную систему прямоугольных импульсов-напряжений, питающих статорные обмотки через усилители мощности. Импульсы могут быть однополярными и двухполярными. Если каждый раз включается одинаковое число фаз, то уп-

Таблица 30.2. Основные технические данные серий ИДПТ

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	$M_{ном}$, мН·м	$M_{пуск}$, мН·м	$I_{ном}$, А	КПД, %	Масса, кг
С электромагнитным возбуждением								
СЛ	24÷220	5÷230	1÷6	14÷900	—	0,25÷11,5	15÷72	0,9÷9,7
СД	27÷60	10÷250	6÷7,5	32÷400	—	0,7÷13	26÷70	0,5÷5,5
С возбуждением от постоянных магнитов с пазовым якорем								
ДПМН1	6÷29	0,04÷14	1,8÷9	0,2÷22,6	0,6÷68,6	0,07÷2,5	4÷35	0,065÷0,34
ДПР09	6÷27	0,6÷25	3÷10	1,5÷32	3,2÷162	0,1÷2	36÷69	0,06÷0,33
С полым якорем								
ДПРН1	6÷27	0,12÷18,5	2,5÷9	0,2÷39	1,57÷245	0,1÷1,3	20÷56	0,036÷0,64
ДПР11	12÷27	1÷25	3÷6	2,5÷51	8,5÷260	0,12÷2,82	48÷74	0,08÷0,6
С дисковым якорем								
ДПР13	12÷110	25÷120	3	80÷390	320÷2700	0,76÷18	40÷55	0,95÷2,45
ПЯ	6÷48	5÷500	3	200÷1700	—	1,6÷32	60÷75	0,36÷9

равление называется симметричным; в противном случае управление несимметричное. Различают также импульсное управление, при котором напряжение подается только на время существования входного сигнала, и потенциальное управление, при котором обмотки ШИД постоянно находятся под напряжением, изменяющимся лишь в моменты поступления сигналов. При импульсном управлении для фиксации ротора при обесточенном состоянии обмоток статора применяются специальные фиксирующие устройства.

В зависимости от частоты управляющих импульсов и характера движения ротора различают четыре режима работы ШИД. В статическом режиме по обмоткам статора протекают постоянные токи и ротор занимает фиксированное положение, зависящее от значения момента нагрузки. Обычно номинальный момент ШИД $M_{ном} = (0{,}4 \div 0{,}5) M_{c\,max}$, где $M_{c\,max}$ — максимальный статический момент. В квазистационарном режиме частота импульсов мала $f_{им} << f_0$, где частота собственных колебаний ротора $f_0 = \sqrt{pM_{c\,max}/J_р}/(2\pi)$, и двигатель отрабатывает единичные шаги. Под шагом понимается угол поворота вала $\alpha_ш$ при воздействии одного сигнала управления. При постоянной частоте управляющих импульсов $f_{им} > f_0$ наступает установившийся режим работы, при котором частота вращения ротора постоянна. Часто ШИД работают в переходных режимах: пуск, торможение, реверс, изменение частоты управляющих импульсов. Основным требованием, предъявляемым к ШИД в переходных режимах, является сохранение синхронизма при изменении частоты импульсов, т. е. отсутствие потери шага. Для каждого двигателя существует определенная предельная частота управляющих импульсов, при которой ротор из состояния покоя еще втягивается в синхронизм без потери шага. Эту частоту называют частотой приемистости $f_{пр}$. Предельная частота, при которой осуществляется торможение без потери шага, обычно выше частоты приемистости и поэтому отдельно не указывается. Предельная частота реверса, при которой происходит изменение направления вращения без выпадения ротора из синхронизма, $f_{реа} \approx (0{,}2 \div 0{,}5) f_{пр}$. Частота приемистости и быстродействие ШИД зависят от суммарного момента инерции вращающихся масс. Обычно момент инерции нагрузки выбирают в пределах $J_н = (1 \div 2) J_р$.

По конструкции и принципу действия ШИД аналогичны специальиым синхронным двигателям. В пазах статора ШИД размещают m-фазную $2p$-полюсную обмотку. Роторы могут быть возбужденными — активными или невозбужденными — пассивными. Роторы активных ШИД чаще всего выполняются с постоянными магнитами без пусковой обмотки (рис. 30.8). Двигатели с активными роторами имеют относительно большие значения шага $\alpha_ш \geq 15°$. Двигатели с пассивными роторами аналогичны индукторным илн реактивным синхронным двигателям. Наибольшее применение получили ШИД индукторного типа с гребенчатой зубцово-пазовой зоиой и с самовозбуждением (рис. 30.9), в которых постоянная составляющая магнитного поля

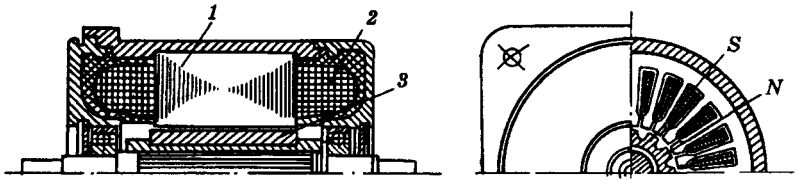


Рис. 30.8. Конструкция ШИД с актианым ротором

1 — статор; *2* — многофазная обмотка управления; *3* — многополюсный магнит-звездочка

Таблица 30.3. Основные технические данные серий ШИД

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$M_{ном}$, мН·м	$\alpha_ш$, град	$f_{пр.ном}$, шаг/с	$f_{пр.х}$, шаг/с	$J_р$, 10^{-7} кг·м^2	Масса, кг
Активный ротор с постоянными магнитами								
ШДА	14÷28	0,27÷3	1÷100	22,5	100÷400	220÷410	3÷150	0,13÷1,5
ДША	13,5	0,8÷7	2,5÷100	22,5	70÷280	90÷330	2,5÷412	0,25÷3,3
ДШ	27	0,3÷8,7	2,5÷160	22,5	230÷430	360÷650	0,4÷60	0,21÷2,5
Пассивный ротор индукторного типа								
ДШИ	27	1,3	28	3	300	340	30	0,45
ШДР	10÷27	0,85÷6,5	1÷30	2,14÷9	400÷700	1100÷1500	0,1÷280	0,21÷0,6
ДШ	27	1,3÷6,4	4÷160	1÷5	550÷1000	630÷1200	0,16÷100	0,36÷2,3
Ротор волнового типа								
ДВШ	12	1,15÷5,3	40÷600	0,225÷0,5	250÷600	1300÷2800	—	0,55÷1,7

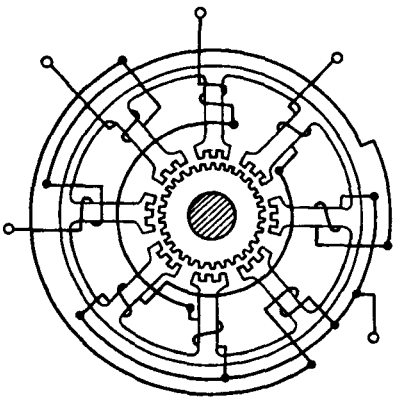


Рис. 30.9. Конструктивная схема ШИД индукторного типа с самовозбуждением

создается за счет однополярных управляющих импульсов при помощи шунтирующих фазы встречных диодов, а переменная составляющая вращается в пространстве в соответствии с частотой тактов коммутации электронного коммутатора. Двигатели индукторного типа позволяют получать шаг $1{,}5° \leq \alpha_ш \leq 10°$. Меньшие значения шага могут быть получены при использовании в качестве ШИД синхронных двигателей с волновым гибким ротором, представляющих собой конструктивное единство синхронных реактивных двигателей с волновой зубчатой передачей (см. § 30.7).

Основные технические данные наиболее распространенных серий четырехфазных ШИД приведены в табл. 30.3.

Более полные сведения об исполнительных двигателях различного типа можно получить в [30.1÷30.6, 30.11, 30.12].

30.2. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тахогенераторами (ТГ) называются информационные электрические машины, преобразующие механическое перемещение вала (вращение) в пропорциональный ему электрический сигнал (выходное напряжение).

Основными требованиями, предъявляемыми к ТГ, являются: минимальная нелинейность H выходной характеристики (у идеального ТГ выходная характеристика $U_г = k_{ус}\, n$); большая крутизна выходной характеристики или максимальный коэффициент усиления $k_{ус} = U_г/n$, мВ/(об/мин); симметрия выходного напряжения $U_{г(+n)} = U_{г(-n)}$; малое остаточное напряжение E_0 при частоте вращения $n = 0$; малая зона нечувствительности; минимальные пульсации выходного напряжения и минимальное изменение его фазы; большая выходная мощность; малый момент инерции ротора и малый момент статического трения; стабильность выходной характеристики при изменении условий окружающей среды.

В схемах автоматики ТГ используются для измерения частоты вращения, в качестве элемента обратной связи по скорости, для осуществления электрического дифференцирования $U_г = k'_{ус}(d\alpha/dt)$ и интегрирования $\alpha = (1/k'_{ус}) \int U_г(t)\, dt$, где $k'_{ус} = \pi k_{ус}/30$; α — угол поворота ротора.

АСИНХРОННЫЕ ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

Асинхронные тахогенераторы (АТГ) по своей конструкции не отличаются от АИД с полым немагнитным ротором (см. § 30.1). При вращении ротора и подключении обмотки возбуждения к сети в роторе наводятся ЭДС и протекают токи, создающие поле реакции ротора. Размагничивающее действие продольной составляющей этого поля, направленной по оси обмотки возбуждения, компенсируется возрастанием потребляемого из сети тока. Поперечная составляющая поля ротора направлена по оси выходной (генераторной) обмотки и наводит в ней выходную ЭДС $E_г$. Все ЭДС и токи статора и ротора изменяются с изменением частоты сети, но значение выходной ЭДС пропорционально частоте вращения.

Теоретически выходная характеристика АТГ ($U_г = f(n)$ при $Z_н = \text{const}$) нелинейна (рис. 30.10).

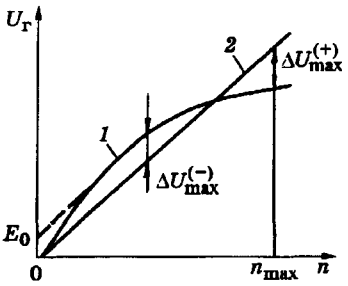


Рис. 30.10. Выходные характеристики реального (*1*) и идеального (*2*) АТГ

Для уменьшения нелинейности, % ($H = 50(\Delta U_{max}^{(+)} + \Delta U_{max}^{(-)})/U_{г.ном}$, где $U_{г.ном}$ — выходное напряжение при $n = n_{ном}$), ротор АТГ выполняют из материалов с большим удельным сопротивлением (фосфористая бронза, сплавы манганина и т. п.).

С целью расширения зоны рабочих частот вращения, в которой выходная характеристика с заданной точностью линейна, АТГ проектируют на повышенную частоту питания (400, 500 Гц).

За фазовую погрешность $\Delta\varphi$ принимают наибольшую разность фаз ЭДС АТГ при номинальной и минимальной частотах вращения в рабочем диапазоне ($\Delta\varphi = \varphi_{n\,ном} - \varphi_{n\,min}$). Амплитудную ΔU и фазовую $\Delta\varphi$ погрешности АТГ можно значительно уменьшить путем подбора характера нагрузки. При определенной активно-емкостной нагрузке минимальна амплитудная погрешность, при активно-индуктивной — фазовая. Наличие нулевого (остаточного) напряжения E_0 в АТГ обусловлено технологическими причинами, вызывающими магнитную асимметрию. С целью уменьшения последней АТГ проектируют с числом полюсов $2p \geq 4$. Температурная погрешность АТГ характеризуется температурным коэффициентом выходного напряжения. Последний равен изменению $U_г$ при изменении температуры на 1 °С. В современных АТГ температурная погрешность невелика — 0,005÷0,15 %/°С.

В зависимости от значений нелинейности АТГ делятся на шесть классов: от $H = \pm 0{,}025\%$ до $H \geq \pm 1\%$. Основные технические данные АТГ приведены в табл. 30.4. Отметим, что при питании обмотки возбуждения постоянным током АТГ могут работать как датчики угловых ускорений — акселерометры.

ТАХОГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По принципу действия тахогенераторы постоянного тока (ТГПТ) аналогичны обычным генераторам постоянного тока независимого возбуждения (см. разд. 28). По конструкции ТГПТ не отличаются от ИДПТ с пазовым или полым ротором (см. § 30.1).

Отличительной особенностью ТГПТ является значительное влияние падения напряжения на щеточно-коллекторном переходе $\Delta U_щ$ на выходную характеристику (рис. 30.11). За счет $\Delta U_щ$ у ТГПТ появляется зона нечувствительности — зона частот вращения от $n = 0$ до $n_{min} = \Delta U_щ / k_{ус}$, в которой $U_г = 0$. С целью уменьшения зоны нечувствительности в ТГПТ устанавливаются медно-графитовые или серебряно-графитовые щетки, а в прецизионных ТГ — проволочные щетки с серебряным, золотым или платиновым покрытием.

Нелинейность выходной характеристики ТГПТ обусловлена в основном размагничивающим действием реакции якоря. Для уменьшения этого влияния магнитная цепь ТГПТ выполняется либо ненасыщенной, либо сильно насыщенной. Нелинейность, крутизна, а также температурный коэффициент выходного напряжения ТГПТ определяются так же, как у АТГ. В современных ТГПТ с электромагнитным возбуждением температурная погрешность колеблется от 0,42 до 0,83%/°С, с возбуждением от постоянных магнитов — от 0,01 до 0,12%/°С. При изменении направления вращения якоря у ТГПТ возникает асимметрия выходного напряжения. Погрешность асимметрии, %, определяется формулой

$$A_т = 100\left[U_{г(+n)} - U_{г(-n)}\right] / \left[U_{г(+n)} + U_{г(-n)}\right],$$

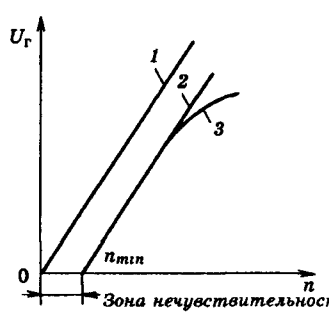


Рис. 30.11. Выходные характеристики ТГПТ

1 — без учета $\Delta U_щ$; *2* — с учетом $\Delta U_щ$; *3* — с учетом влияния реакции якоря

Таблица 30.4. Основные технические данные серий АТГ

Тип АТГ	$U_в$, В	f, Гц	$I_в$, А	n_{max}, 10^3 об/мин	$k_{ус}$, мВ/(об/мин)	E_0, мВ	H, %	Масса, кг
АТ	20÷127	50÷500	0,15÷0,75	1,5÷6	0,4÷5,5	1,5÷80	0,1÷5,3	0,25÷2,2
ТГ	110÷115	400	0,06÷0,3	3÷9	1,2÷8,3	25÷50	2÷2,5	0,28÷1,5
ДИГ	36	400	0,2	10	2	60	2	0,18
ТИ	115	400	0,2	4	3,2	50÷65	0,1	0,32
ТД	110÷127	50	0,13÷0,15	2,4	8	25÷50	1,5	3,0

Таблица 30.5. Основные технические данные серий ТГПТ

Тип ТГПТ	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	$k_{ус}$, мВ/(об/мин)	H, %	$A_т$, %	$J_р$, 10^{-7} кг·м^2	$k_{пул}$, %	Масса, кг
СЛ	3÷3,7	16÷20	2÷3	2÷3	50÷200	—	0,45÷1,3
ТД	1,5	23÷100	1,5	2÷2,5	60÷200	—	0,7
ТГП	1,5÷9	2÷60	0,1÷5	0,2÷1	0,5÷8	2,5÷10	0,03÷0,12
ТП	1,5÷3	6÷400	0,1÷1	0,25÷5	0,3÷360	2,5÷5	0,06÷0,9
ТГ	1,1÷2,4	21÷96	1	1	60÷200	—	1÷1,8

где $U_{г(+n)}$, $U_{г(-n)}$ — выходные напряжения при вращении якоря с одинаковой частотой вращения n в разных направлениях. Вследствие наличия магнитной асимметрии, зубчатости якоря и щеточно-коллекторного узла у ТГПТ появляются якорные, зубцовые и коллекторные пульсации выходного напряжения. Коэффициент пульсации рассчитывается по формуле, %,

$$k_{пул} = 50(U_{г\,max} - U_{г\,min})/U_{г.ср},$$

где $U_{г\,max}$, $U_{г\,min}$ — наибольшее и наименьшее значения выходного напряжения за один оборот; $U_{г.ср}$ — среднее значение выходного напряжения. Эти напряжения измеряются вольтметром магнитно-электрической системы или определяются по осциллограмме. Зубцовые и коллекторные пульсации могут быть значительно уменьшены включением в цепь якорной обмотки емкостных фильтров.

В зависимости от значений погрешностей ТГПТ делятся на семь классов: от $H = \pm 0{,}02\%$ до $H = \pm 2{,}5\%$. Основные технические данные ТГПТ приведены в табл. 30.5.

СИНХРОННЫЕ ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

Синхронные тахогенераторы (СТГ) — это синхронные генераторы с ненасыщенной магнитной системой, возбуждаемые постоянными магнитами, расположенными на роторе.

В пазах статора СТГ располагается трехфазная, двухфазная или однофазная обмотка. Особенностью СТГ является то, что не только амплитуда наводимой в обмотке якоря ЭДС, но и ее частота пропорциональны частоте вращения ротора. Поэтому СТГ используются либо в качестве информационного элемента для измерения частоты вращения рабочего механизма, либо в качестве генератора опорного напряжения (ГОН) в фазочувствительных схемах следящих систем. Иногда СТГ применяются в качестве датчиков частоты вращения с синусоидальной формой кривой выходного напряжения.

Основные технические данные СТГ приведены в табл. 30.6. Коэффициент искажения синусоидальной формы кривой выходного напряжения, %, рассчитывается по формуле

$$k_{ис} = 100\sqrt{\sum U_\nu^2}\,/U_{вых},$$

где U_ν — действующее значение напряжения ν-й гармоники.

Таблица 30.6. Основные технические данные СТГ

Тип СТГ	$U_{вых}$, В	f, Гц	$k_{ис}$, %	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	Масса, кг
ГОН	30÷140	30÷80	5÷15	1,8÷4,8	0,15÷1,3
СГ	30÷60	25÷50	3	1,5÷3	1

Более подробные сведения о тахогенераторах различных типов приведены в [30.1÷30.3, 30 12].

30.3. СЕЛЬСИНЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сельсинами называются электрические машины, преобразующие механическое перемещение вала (угол поворота) в систему электрических сигналов (напряжений), содержащих информацию о положении ротора.

По характеру токосъема сельсины делятся на контактные и бесконтактные. Конструктивно контактные сельсины аналогичны двухполюсным синхронным машинам. Они содержат на явнополюсном (или неявнополюсном) роторе (или статоре) однофазную первичную обмотку — обмотку возбуждения. Вторичная обмотка — обмотка синхронизации — всегда выполняется распределенной по пазам статора (или ротора) трехфазной соединенной в звезду. Для уменьшения переходного сопротивления контактные кольца и щетки обычно изготавливаются из сплавов серебра. Бесконтактные сельсины выпускаются либо с внешним магнитопроводом и униполярным возбуждением (рис. 30.12), либо с кольцевым трансформатором (рис. 30 13). В первом случае магнитная связь между расположенными на статоре обмотками возбуждения и синхронизации осуществляется за счет большого немагнитного промежутка в роторе. Во втором случае расположенная на роторе обмотка возбуждения сельсина питается от вторичной обмотки трансформатора, кольцевой магнитопровод которого выполнен с воздушным зазором.

Независимо от конструктивного исполнения сельсинов при питании обмотки возбуждения переменным напряжением в обмотках синхронизации индуцируются ЭДС, амплитуда которых зависит от углового положения ротора. Однако в качестве датчиков угла сельсины используются редко. Наиболее часто сельсины применяются в системах синхронных дистанционных передач информации об угловом положении объекта и в качестве измерителей

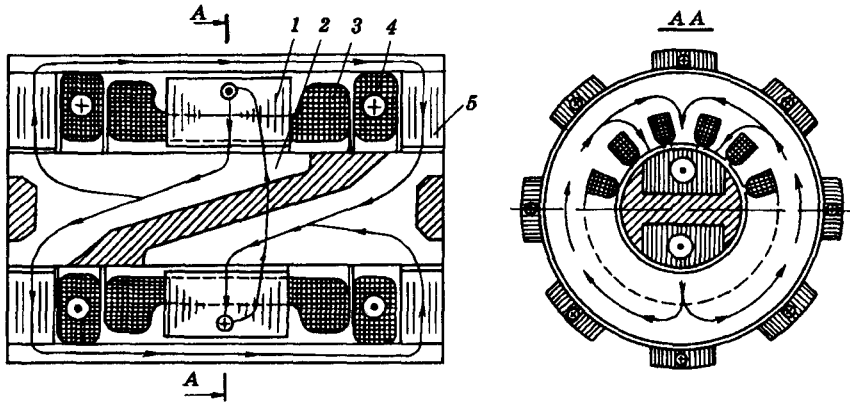


Рис. 30.12. Конструктивная схема бесконтактного сельсина с униполярным возбуждением
1 — статор; *2* — ротор; *3* — обмотка синхронизации; *4* — обмотка возбуждения; *5* — тороиды

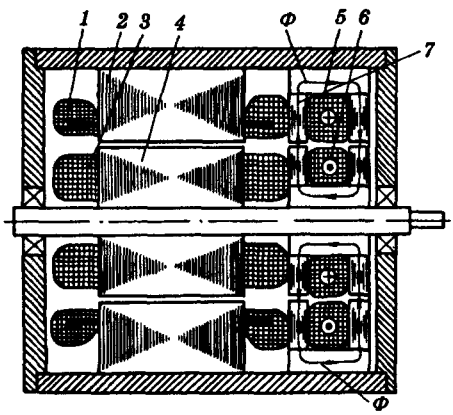


Рис. 30.13. Конструкция бесконтактного сельсина с кольцевым трансформатором
1 — обмотка синхронизации; *2* — статор; *3* — обмотка возбуждения; *4* — ротор; *5* — первичная обмотка трансформатора; *6* — вторичная обмотка; *7* — магнитопровод кольцевого трансформатора

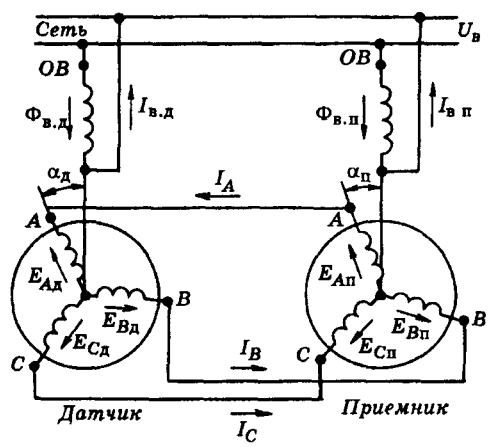


Рис. 30.14. Схема индикаторной синхронной связи

рассогласования следящих систем. В системах дистанционных передач сельсины могут работать в индикаторном или трансформаторном режимах.

ИНДИКАТОРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Простейшая индикаторная схема синхронной связи состоит из двух одинаковых сельсинов (датчика и приемника), обмотки синхронизации которых соединены трехпроводиой линией связи, а обмотки возбуждения *ОВ* питаются от одного источника (рис. 30.14). При одинаковом расположении обмоток синхронизации относительно соответствующих обмоток возбуждения ($\alpha_д = \alpha_п$) в них наводятся одинаковые, уравновешивающие одна другую, ЭДС. Такое положение сельсинов называется согласованным. Если $\alpha_д \neq \alpha_п$, то равновесие ЭДС нарушается, по обмоткам синхронизации и линии связи протекают токи. Последние, взаимодействуя с полем возбуждения, создают встречно направленные синхронизирующие моменты. Момент датчика воспринимается задающим угол механизмом. Ротор приемника механически свободен (на его валу находится лишь стрелка или шкала), и под действием момента он поворачивается до тех пор, пока не придет в новое согласованное положение. В случае, когда информация об угловом положении датчика требуется в нескольких местах, к одному датчику подключают несколько приемников (до 30).

Точность передачи заданного датчиком угла определяют следующие факторы: удельный синхронизирующий момент $M_{уд}$ — момент при угле рассогласования $\theta = \alpha_д - \alpha_п = 1°$; момент трения $M_{тр}$ на валу приемника; добротность $D = M_{уд}/M_{тр}$; сопротивление линии связи; магнитная и электрическая асимметрия, небаланс ротора приемннка; время успокоения — время, в течение которого ротор приемника занимает согласованное положение после рассогласования на угол $\theta \approx 179°$; количество приемников, работающих от одного датчика.

При работе N приемников от одного датчика удельный синхронизирующий момент каждого

приемника уменьшается: $M_{уд\,N} = 2M_{уд\,1}/(N+1)$. Для уменьшения времени успокоения и повышения динамической устойчивости сельсины-приемники снабжают электрическими и механическими демпферами. В современных сельсинах время успокоения $t_{ус} \leq 3 \div 4$ с. В зависимости от погрешности следования $\Delta\alpha$ — отклонения ротора приемника от углового положения ротора датчика в согласованном положении, сельсины в индикаторном режиме делятся на четыре класса точности: I класс — $\Delta\alpha \leq 30'$, IV класс — $\Delta\alpha \leq 90'$.

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Трансформаторная система синхронной связи применяется там, где на ведомой оси имеется значительный момент нагрузки. В такой системе сельсин-приемник лишь передает в виде электрического сигнала информацию об угловом положении сельсина-датчика исполнительному двигателю, механически и электрически связанному с приемником (рис. 30.15). В трансформаторном режиме токи в обмотках синхронизации и линии связи протекают при любых положениях сельсинов. Эти токи создают в приемнике результирующее пульсирующее магнитное поле, направление которого зависит от углового положения датчика. При ортогональном расположении к полю в выходной обмотке приемника наводится небольшая остаточная ЭДС, обусловленная магнитной асимметрией. Такое расположение называется согласованным. В других положениях ЭДС выходной обмотки возрастает по синусоидальному закону с увелнчением угла рассогласования. Эта ЭДС, усиливаясь, подается на обмотку управления нсполнительного двнгателя, который приводит ротор приемника и нагрузочный механизм в согласованное положение. Отметим, что согласованное положение в трансформаторном режиме отличается от такового в индикаторном режиме на угол 90°.

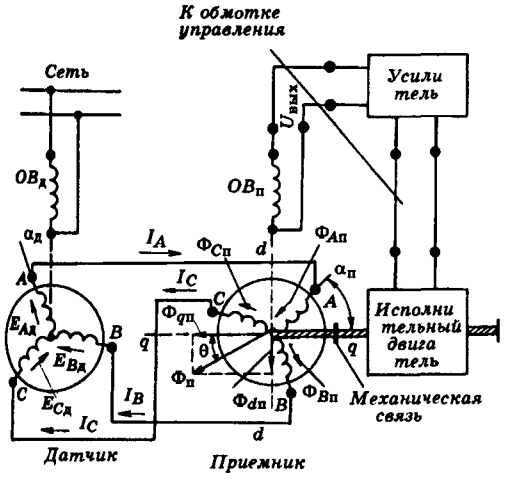


Рис. 30.15. Схема трансформаторной синхронной связи

Качество работы сельсинов в трансформаторном режиме определяется: остаточным напряжением; удельным выходным напряжением — напряжением, приходящимся на 1° угла рассогласования; удельной выходной мощностью; магнитной и электрической асимметрией; сопротивлением линии связи. В зависимости от погрешности передачи углового перемещения сельсины в трансформаторном режиме делятся на 11 классов точности: I класс — $\Delta\alpha \leq \pm 0{,}1'$, XI класс — $\Delta\alpha \leq \pm 30'$. В современных сельсинах удельное выходное напряжение $U_{уд} = 0{,}1 \div 2$ В/град.

Принципиально однофазные сельсины могут работать как в индикаторном, так и в трансформаторном режиме в качестве датчика и приемника. Однако в виду специфичности предъявляемых требований выпускаемые сельсины предназначаются для конкретного режима работы.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕЛЬСИНЫ

Конструктивно дифференциальные сельсины (ДС) выполняются с трехфазными распределенными по пазам обмотками на статоре и роторе. В схемах синхрониой связи ДС используются либо как промежуточные (вторые) датчики ($\alpha_п = \alpha_д \pm \alpha_{ДС}$), либо как приемники, работающие от двух датчиков ($\alpha_{ДС} = \alpha_{д1} \pm \alpha_{д2}$). В обоих случаях обмотка статора ДС соединяется линией связи с обмоткой синхронизации одного сельсина, а обмотка ротора ДС — с обмоткой синхронизации другого сельсина.

Основные технические данные некоторых серий сельсинов представлены в табл. 30.7. Иногда в маломощных индикаторных системах синхронной связи, когда не требуется высокая точность ($\Delta\alpha = 1 \div 2{,}5°$), применяют тороидальные сельсины с возбуждением от постоянных магнитов — магнесины Более подробные сведения о сельсинах приведены в [30 1÷30.3, 30.12].

30.4. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) — это нн-формационные электрические машины, преобразующие механическое перемещение вала (угол поворота) в электрический сигнал (напряжение), находящнйся в определенной функциональной зависимости от этого перемещения. По конструкции большинство двухполюсных ВТ аналогично двухфазному асинхронному двигателю с фазным ротором. Магнитопровод ВТ выполняют ненасыщенным из лнстов электротехнической стали, в пазах статора и ротора размещают по две взаимно перпендикулярные обмоткн: возбуждения и квадратурную — на статоре, синусную и косинусную — на роторе Взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора изменяется с большой степенью точности по закону синуса (косинуса) при вращении (повороте)

Таблица 30.7. Основные технические данные сельсинов

Тип сельсина	$U_{в.ном}$, В	f, Гц	$I_{в.ном}$, А	$M_{уд}$, мН · м	Масса, кг
Контактные					
НД	110	50÷500	0,33÷1,3	—	0,39÷5,2
НС	110	50	0,33÷0,75	1÷4,9	0,85÷3
СС	110	50	0,13	—	0,8
Бесконтактные					
БД	110÷127	50÷500	0,26÷1,35	—	0,48÷4
БС	110÷127	50÷500	0,09÷1,35	0,14÷3,2	0,47÷4,3
СБ	36	400	0,012÷0,15	—	0,07÷0,16
Дифференциальные					
НЭД	49÷150	50÷500	0,35÷0,53	0,4÷3,4	0,88÷3
ДИД	50÷100	50÷400	0,11÷0,15	—	0,46÷2,7

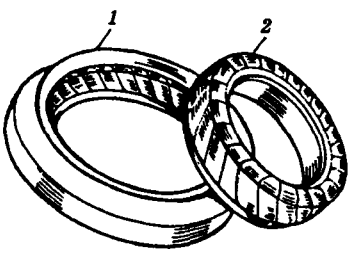


Рис. 30.16. Конструкция многополюсных ВТ
1 — статор; *2* — ротор

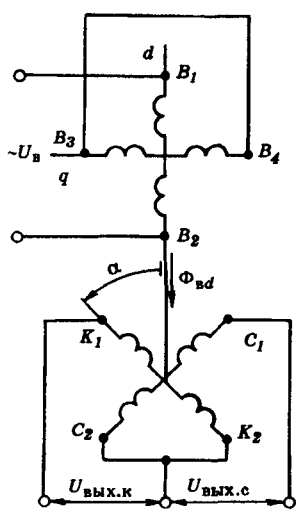
ротора. В зависимости от характера токосъема ВТ могут быть с неограниченным и с ограниченным углом поворота ротора. В первом случае частота вращения ВТ $n \leq 100$ об/мин, *во* втором — скользящие контакты заменяются спиральными пружинами, ограничивающими угол поворота в пределах 540°. При больших частотах вращения ($n = 500 \div 1000$ об/мин) ВТ выполняют бесконтактными по типу сельсинов с кольцевым вращающимся трансформатором (см. § 30.3). Многополюсные ВТ обычно изготавливают плоскими и бескорпусными (рис. 30.16). Такие ВТ не имеют подшипниковых щитов, так как встраиваются непосредственно в прибор.

По назначению ВТ разделяются на ВТ для счетно-решающих устройств и ВТ для систем дистанционных передач.

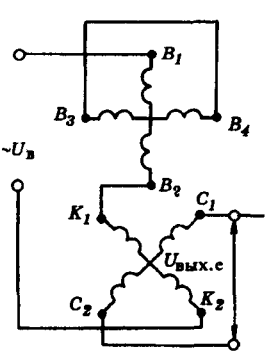
ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ СЧЕТНО-РЕШАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В зависимости от схемы соединиения обмоток и выполняемых ВТ функций различают синусно-косинусные ВТ (рис. 30.17, *а*), масштабные ВТ, линейные ВТ (рис. 30.17, *б*) и ВТ-фазовращатели. Масштабные ВТ отличаются от синусно-косинусных только наличием специального стопорного устройства для фиксации ротора в нужном положении.

В синусно-косинусном ВТ напряжение возбуждения $U_в$ подается на одну из статорных обмоток $B_1\ B_2$. Другая обмотка $B_3\ B_4$ закорачивается накоротко. Выходные напряжения $U_{вых.к}$ и $U_{вых.с}$ изменяются в зависимости от положения синусной $C_1\ C_2$ и косинусной $K_1\ K_2$ обмоток по отношению к потоку возбуждения $\Phi_{вd}$. Угол α характеризует



а)



б)

Рис. 30.17. Схемы синусно-косинусного (*а*) и линейного (*б*) ВТ с первичным симметрированием

Таблица 30.8. Основные технические данные ВТ для счетно-решающих устройств

Тип ВТ	$U_{в.ном}$, В	k	$\varepsilon_с$, %	$\varepsilon_к$, %	$M_{тр}$, мН·м	n_{max}, об/мин	Масса, кг
ВТ-2А	110	0,15÷0,96	0,06÷0,2	0,11÷0,22	22	6÷15	2
ВТМ-Б	60÷115	0,56÷1	—	0,1÷0,3	60	60	0,68
ВТ-5	40÷127	0,37÷1	0,02÷0,06	0,11÷0,22	13	5÷60	0,68
МВТ-2	28÷50	0,56÷1	0,02÷0,1	—	1,5÷6	60	0,22÷0,35
ВТ-3А	60÷220	0,14÷0,93	0,06÷0,2	0,11÷0,22	10	500	0,5

положение косинусной обмотки по отношению к потоку.

В линейном ВТ напряженне питания подается на последовательно соединенные обмоткн статора (возбуждения) и ротора (косинусную).

Главным требованием к ВТ вычислительных устройств является точность выполнения ими функциональных преобразований. Погрешность отображения синусной зависимости $\varepsilon_с$ (отклонение выходного напряжения в зависимости от угла поворота ротора от идеальной синусоиды) определяется полусуммой абсолютных значений максимальных положительной $\Delta U_{вых}^{(+)}$ и отрицательной $\Delta U_{вых}^{(-)}$ погрешностей, отнесенной к максимальному значению выходного напряжения $U_{вых\ max}$, и выражается в процентах:

$$\varepsilon_с = 50\left(\Delta U_{вых}^{(+)} + \Delta U_{вых}^{(-)}\right) / U_{вых\ max}.$$

В зависимости от значений указанного параметра синусно-косинусные ВТ делятся на шесть классов точности — от $\varepsilon_с \le \pm 0{,}01\%$ до $\varepsilon_с \le \pm 0{,}3\%$. Погрешность отображения линейной зависимости $\varepsilon_л$ (отклонение выходного напряжения в зависимости от угла поворота ротора от идеальной прямой линии) определяется аналогично, но в диапазоне углов $-60 \div +60°$. В зависимости от значений этой погрешности линейные ВТ делятся на пять классов точности — от $\varepsilon_л \le \pm 0{,}02\%$ до $\varepsilon_л \le \pm 0{,}3\%$. При оценке точности ВТ учитывают еще ряд параметров. Основными из них являются: остаточная ЭДС ($e_0 = 100E_0/U_{вых\ max}$), которая должна находиться в пределах от 0,006 до 0,15%; асимметрия нулевых точек, характеризующая неперпендикулярность обмоток, ($\Delta\alpha \le \pm 20'' \div \pm 10'$); ЭДС квадратурной обмотки ($e_{кв} = 100E_{кв}/U_{вых\ max} \le 1{,}8\%$); неравенство коэффициентов трансформации k синусной н косинусной обмоток ($\Delta k = 100(k_{max} - k_{min})/k_{max} \le 0{,}3\%$). Для уменьшения погрешностей ВТ на практике применяют первичное симметрирование, которое осуществляют, как правило, замыканием накоротко квадратурной обмотки.

Основные технические данные некоторых серий ВТ на частоту $f = 400 \div 500$ Гц для счетно-решающих устройств приведены в табл. 30.8.

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ПЕРЕДАЧ

В схемах синхронной связи, в следящих системах и системах дистанционных передач ВТ, как и сельсины, могут работать в качестве датчиков и приемников. Наиболее часто ВТ используются в трансформаторных схемах дистанционных передач (схема включения аналогична схеме на рис. 30.15). В отлнчие от сельсинов ВТ обеспечивают значительно бо́льшую точность, но имеют меньшую выходную мощность. Погрешность следования ВТ в трансформаторной дистанционной передаче (ТДП) $\varepsilon_{ТДП}$ определяется так же, как погрешность сельсинов в трансформаторном режиме. В зависимости от этой погрешности ВТ разделяются на 12 классов точности — от $\varepsilon_{ТДП} \le \pm 0{,}05'$ до $\varepsilon_{ТДП} \le \pm 30'$.

В системах дистанционных передач ВТ используются как обычные двухполюсные ВТ для одноканальных систем грубого отсчета, так и специальные многополюсные ВТ для систем двухканального грубого и точного отсчетов. Основные технические данные некоторых серий двухполюсных (данные в числителе) и многополюсных (данные в знаменателе) ВТ приведены в табл. 30.9.

В настоящее время в следящих системах с малым углом поворота и повышенной точностью отсчета кроме обычных применяются специальные ВТ — индуктосины и редуктосины [30.1].

ВТ-ПОСТРОИТЕЛИ

В схемах счетно-решающих устройств и в следящих системах ВТ в режиме построителя выполняют функции преобразователей координат — производят преобразование декартовой системы координат

Таблица 30.9. Основные технические данные ВТ для систем дистанционных передач

Тип ВТ	$U_{в.ном}$, В	$U_{вых\ max}$, В	$\varepsilon_с$, %	$\varepsilon_{ТДП}$	Масса, кг
ВТП	$\frac{27}{12 \div 40}$	$\frac{27}{30 \div 48}$	$\frac{0{,}2 \div 0{,}35}{0{,}1 \div 0{,}3}$	$\frac{2 \div 10'}{0{,}3 \div 1'}$	$\frac{0{,}37}{0{,}5}$
СКТ	$\frac{8 \div 36}{36}$	$\frac{4{,}5 \div 36}{6 \div 8{,}5}$	$\frac{0{,}1 \div 0{,}35}{0{,}2 \div 0{,}3}$	$\frac{5 \div 20'}{0{,}5 \div 10'}$	$\frac{0{,}045 \div 0{,}17}{0{,}045 \div 0{,}18}$

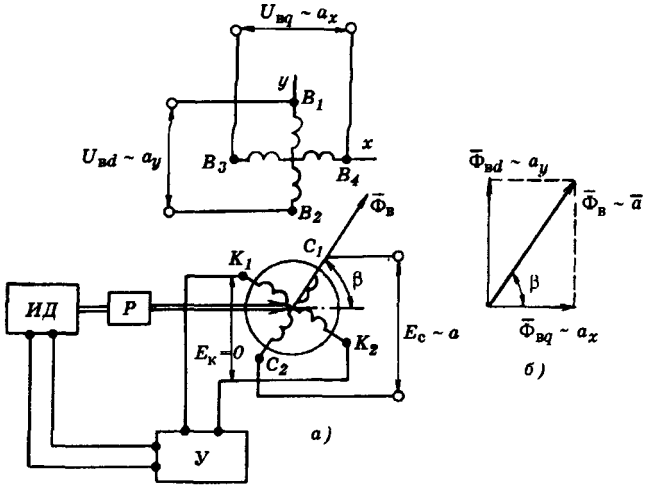


Рис. 30.18. Схема ВТ-построителя (*а*) и диаграмма магнитных потоков (*б*)

в полярную или в другую декартовую систему, повернутую относительно первой на некоторый угол.

Принципиальная схема ВТ-построителя приведена на рис. 30.18. При подаче на обмотки статора напряжений, пропорциональных декартовым координатам вектора $\bar{a}$ ($U_{вd} \sim a_y$; $U_{вq} \sim a_x$), образуются пульсирующие магнитные потоки, которые при отсутствии насыщения прямо пропорциональны вектору $\bar{a}$ и его координатам ($\bar{\Phi}_в \sim \bar{a}$; $\bar{\Phi}_{вd} \sim a_y$, $\bar{\Phi}_{вq} \sim a_x$). ЭДС $E_к$, наводимая результирующим потоком в одной из обмоток ротора, подается через усилитель *У* на обмотку управления исполнительного двигателя *ИД*. Последний через редуктор *Р* поворачивает ротор ВТ до положения, при котором $E_к = 0$. При этом $E_c = E_{c\,max} \sim \bar{\Phi}_в \sim \bar{a}$, а угол β между осью квадратурной обмотки и осью синусной обмотки равен аргументу вектора $\bar{a}$ в полярной системе координат.

Более подробные сведения о ВТ различных типов приведены в [30.1÷30.3, 30.7, 30.12].

30.5. АСИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Силовые асинхронные двигатели (АД) малой мощности общепромышленного применения по своей конструкции, свойствам, тем требованиям, которые к ним предъявляются, практически не отличаются от АД средней и большой мощности. У большинства из них обычная для АД механическая характеристика, обеспечивающая устойчивую работу лишь в узком диапазоне частот вращения $(0{,}8 \div 0{,}85) n_c < n < n_c$.

По типу роторов асинхронные микродвигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым ротором, имеющими обмотку в виде "беличьей клетки", и двигатели с ферромагнитным ротором. Последние применяются в тех случаях, когда необходимо иметь мягкую механическую характеристику или регулировать частоту вращения в широких пределах. Так как микродвигатели чаще работают при сравнительно больших частотах вращения, то, как правило, они выполняются с самовентиляцией — охлаждаются расположенными на валу вентиляторами внутреннего или наружного обдува.

По числу фаз питающей сети асинхронные микродвигатели разделяются на трехфазные, однофазные и универсальные.

ТРЕХФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Трехфазные асинхронные микродвигатели выпускаются как на промышленную, так и на повышенные частоты. Наиболее массовыми являются микродвигатели, входящие в единую серию АД — серию РА, выполненную на базе серий 4А и АИ. Это двигатели с высотами оси вращения 50, 56, 63 и 73 мм (см. разд. 26). Наряду с двигателями серии РА широко применяются микродвигатели серий АОЛ, АПН, АВ, ДАТ (табл. 30.10). Двигатели этих серий имеют достаточную кратность пускового момента $k_п = M_{пуск}/M_{ном} = 1{,}2 \div 2$ при кратности пускового тока $k_I = I_{пуск}/I_{ном} = 3 \div 6$ и высокую перегрузочную способность $k_M = M_{max}/M_{ном} = 1{,}7 \div 2{,}5$. Для привода вентиляторов выпускаются двигатели типа АДВ с внешним короткозамкнутым ротором.

ОДНОФАЗНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

По конструкции двигатели, питающиеся от однофазной сети, чаще всего выполняются двухфазными. Одну из фаз условно называют главной, или рабочей, другую — вспомогательной, или пусковой. Необходимость расположения на статоре не менее двух фаз диктуется тем, что чисто однофазный АД с симметричной магнитной системой не создает пускового момента. Для запуска такого двигателя необ-

Таблица 30.10. Основные технические данные серий трехфазных АД

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	$I_{ном}$, А	КПД, %	cos φ	Масса, кг
Частота 50 Гц							
АОЛ	127÷380	50÷600	1,39÷2,8	0,28÷4,3	43÷75	0,62÷0,85	3,0÷9,2
АПН	220÷380	50÷600	1,39÷2,83	0,29÷2,15	42÷70	0,58÷0,75	3,9÷9,0
АВО	127÷380	18÷600	1,3÷2,8	0,12÷4,1	34÷78	0,56÷0,87	1,4÷8,4
ДАТ	127÷380	4÷90	1,28÷2,75	0,16÷0,95	20÷68	0,60÷0,88	0,45÷2,2
УАД	220	1,2÷70	1,28÷2,7	0,05÷0,40	9÷65	0,40÷0,50	0,25÷1,9
АДВ	220÷380	6÷25	1,37÷1,38	0,05÷0,24	38÷50	—	1,1÷1,9
Частота 400 Гц							
ДАТ	36÷220	1,6÷750	4,8÷11,5	0,15÷5,3	13÷84	0,40÷0,82	0,12÷5,8
АОЛП	220÷380	180÷600	3,75÷4,6	1,0÷3,9	63÷74	0,45÷0,54	5,1÷8,4

ходимо раскрутить ротор в каком-либо направлении.

Пусковой момент может быть получен лишь при наличии вращающегося магнитного поля. Для создания последнего необходимо иметь минимум две сдвинутые в пространстве на угол α фазы, обтекаемые токами, сдвинутыми во времени на угол β. При равенстве МДС фаз ($F_A = F_B$) и выполнении условия $\alpha+\beta = \pi$ в двигателе образуется круговое вращающееся поле. Развиваемый при этом момент $M \sim F_A F_B \sin\alpha \sin\beta$. Для получения большего вращающего момента оси фаз располагают под углом $\alpha = \pi/2$. Сдвиг токов во времени обеспечивают включением во вспомогательную фазу фазосдвигающего элемента — резистора или конденсатора.

В двигателях с пусковым резистором (часто пусковая фаза выполняется с повышенным сопротивлением) угол $\beta<\pi/2$ и магнитное поле эллиптическое; в двигателях с пусковым конденсатором угол $\beta \gtrsim \pi/2$ и поле ближе к круговому. В обоих случаях вспомогательная обмотка после разгона двигателя отключается и двигатель работает как чисто однофазный с резко эллиптическим результирующим полем. Отсюда низкие энергетические показатели и малая перегрузочная способность. В двигателях с постоянно включенным конденсатором емкость последнего выбирается, как правило, из условий обеспечения кругового поля в номинальном режиме. При этом поле при пуске далеко от кругового и пусковой момент невелик. Для улучшения пусковых свойств параллельно рабочему конденсатору $C_р$ на время пуска подключается пусковой конденсатор $C_п$ (рис. 30.19).

В электроприводах с легкими условиями пуска часто применяются однофазные АД с экранированным полюсами. В них роль вспомогательной фазы играют размещаемые на явновыраженных полюсах статора короткозамкнутые витки (рис. 30.20). Поскольку пространственный угол между осями главной фазы (обмотки возбуждения) и витка $\alpha << \pi/2$, поле в таком двигателе резко эллиптическое. Поэтому пусковые и рабочие свойства двигателей с экранированными полюсами невысоки. Кроме того, магнитное поле возбуждения таких двигателей содержит значительную третью гармонику, что вызывает провал в механической характеристике при частотах вращения ротора $n \approx n_c/3$. Для уменьшения указанного провала применяются магнитные шунты между полюсами.

Основные технические данные однофазных АД на напряжение 220 В приведены в табл. 30.11.

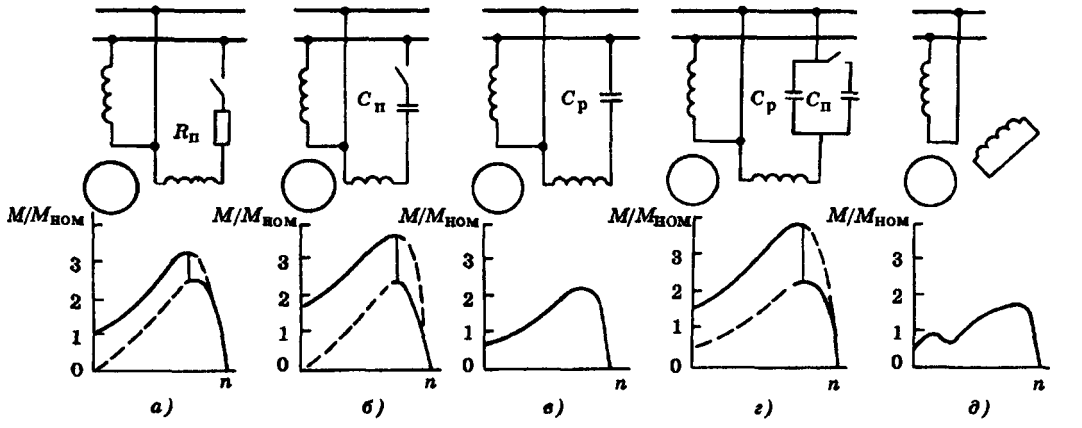


Рис. 30.19. Схемы включения и механические характеристики однофазных АД

а — с пусковым резистором; *б* — с пусковым конденсатором; *в* — с рабочим конденсатором; *г* — с рабочим и пусковым конденсаторами; *д* — с экранированными полюсами

Таблица 30.11. Основные технические данные

Тип двигателя	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	k_I, отн. ед.	$k_п$, отн. ед.	k_M, отн. ед.	КПД, %	cos φ, отн. ед.
С повышенным сопротивлением пусковой фазы							
АОЛБ	18÷600	1,37÷2,94	6,5÷9,0	1,0÷1,2	1,4÷2,2	22÷69	0,52÷0,72
4АЕ	25÷550	1,34÷2,84	7,5÷8,5	0,8÷1,0	1,5÷1,7	37÷62	0,65÷0,83
ДХМ	60÷150	1,44÷2,91	5,7÷8,5	1,7÷2,2	2,2÷3,1	50÷70	0,56÷0,62
ДГ	70÷200	1,43÷2,85	7,5÷9,3	1,1÷2,3	1,9÷2,9	60÷71	0,54÷0,72
С пусковым конденсатором							
АОЛГ	18÷600	1,37÷2,94	3,0÷5,5	2,0÷2,5	1,5÷1,9	22÷69	0,68÷0,72
4АЧ	40÷550	1,34÷2,84	4,0÷5,5	1,6÷1,8	1,5÷1,7	37÷62	0,65÷0,82
С рабочим конденсатором							
АВЕ	10÷400	1,40÷2,80	2,5÷4,5	0,4÷0,7	1,5÷1,8	30÷72	0,86÷0,95
4АТ	40÷750	1,32÷2,82	2,5÷5,0	0,4÷0,6	1,5÷1,7	45÷68	0,82÷0,95
КД	25÷60	1,35÷2,80	1,4÷3,3	0,4÷1,3	1,4÷2,5	15÷60	0,80÷0,95
УАД	1÷50	1,28÷2,75	1,5÷5,0	0,1÷0,5	1,5÷2,0	9÷60	0,70÷0,80
С пусковым и рабочим конденсаторами							
АОЛД	30÷1000	1,43÷2,94	2,5÷5,0	1,0÷1,2	1,6÷2,0	33÷70	0,88÷0,98
4АУТ	40÷750	1,32÷2,82	2,5÷5,5	1,5÷2,0	1,5÷1,7	45÷68	0,82÷0,95
С экранированными полюсами							
АДЕ	2,5÷25	1,28÷1,33	—	0,1÷0,6	1,4÷1,7	11÷24	0,5÷0,6
ДВЛВ	0,6÷10	1,28÷2,70	1,3÷1,6	0,2÷0,8	1,2÷1,6	7÷25	0,4÷0,6
ДАО	1,6÷16	2,35÷2,68	1,3÷1,5	0,1÷0,6	1,2÷1,5	9÷23	0,4÷0,6

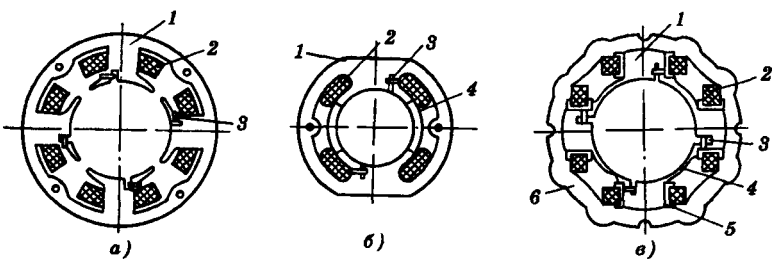


Рис. 30.20. Конструктивные схемы статоров АД с экранированными полюсами

а — без магнитного шунта; *б* — с магнитным шунтом; *в* — со сборным статором; *1* — сердечник статора; *2* — обмотка статора; *3* — короткозамкнутый виток; *4* — магнитный шунт; *5* — крестовина; *6* — ярмо статора

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Универсальными АД называются двигатели, которые могут работать как от трехфазных, так и от однофазных сетей. Такие двигатели выполняются как трехфазные. Наиболее распространенные схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть показаны на рис. 30.21. Для схемы рис. 30.21, *а* рабочая емкость приближенно может быть определена по формуле $C_р = 2400 I_{ном}/(U_{ном} \cos \varphi_{ном})$, для схем рис. 30.21, *б*, *в* — $C_р = 2750 I_{ном} / (U_{ном} \times \times \sqrt{1-\cos \varphi_{ном}})$, где $I_{ном}$, $U_{ном}$, $\cos \varphi_{ном}$ — линейные ток, напряжение и коэффициент мощности трехфазного двигателя в номинальном режиме. Обычно при однофазном питании универсальные двигатели имеют пусковые и рабочие характеристики на 20÷40% ниже, чем при трехфазном питании. Наибольшее применение в качестве универсальных АД находят двигатели серий ДА, 4А и УАД.

Более подробные сведения об асинхронных микродвигателях приведены в [30.1÷30.3, 30.5, 30.8, 30.12].

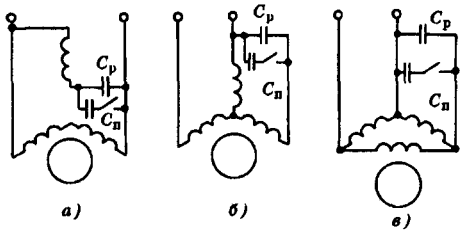


Рис. 30.21. Схемы включения трехфазных АД в однофазную сеть

а —последовательно-параллельная; *б* — в звезду, *в* — в треугольник

однофазных АД

$C_п$, мкФ	$C_р$, мкФ	Масса, кг
—	—	3÷30
—	—	3÷15
—	—	2,2÷5,9
—	—	3,7÷5,8
5÷90	—	3÷30
10÷100	—	3÷15
—	0,75÷8	1,4÷8,4
—	6÷82	3÷15
—	1÷8	0,8÷2,4
—	0,5÷5	0,3÷1,9
5÷125	2,5÷45	3÷30
50÷200	6÷82	3÷15
—	—	0,6÷2,5
—	—	0,3÷1,5
—	—	0,3÷2,0

30.6. СИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В синхронных двигателях (СД) угловая скорость ротора жестко связана с частотой питающего источника $\Omega = 2\pi f/p$. Они широко используются там, где требуется постоянная частота вращения при изменениях момента нагрузки и напряжения питания.

В зависимости от конструкции ротора различают: двигатели с возбуждением от постоянных магнитов; реактивные двигатели; гистерезисные двигатели. Электромагнитное возбуждение в СД малой мощности применяется крайне редко. Независимо от конструктивного исполнения ротора статор СД аналогичен статору АД. На статоре располагается либо трехфазная, либо двухфазная с фазосмещающими элементами, либо однофазная с короткозамкнутыми витками на явновыраженных полюсах обмотка, создающая вращающееся магнитное поле.

К СД, предназначенным для работы в автоматических системах, кроме общих для силовых двигателей требований (высокие энергетические показатели, малые габариты и масса и др.) предъявляются еще и специальные требования (постоянство скорости в пределах одного оборота, способность синфазного вращения и т. п.). Предпочтительные области применения того или иного типа СД определяются присущими двигателям достоинствами и недостатками. Так, СД с постоянными магнитами, обладающие более высокими энергетическими показателями и стабильностью угловой скорости, имеют более сложную конструкцию, меньшую технологичность и высокую стоимость. Реактивные СД просты по конструкции, технологичны, но имеют низкие энергетические показатели и не могут втягивать в синхронизм нагрузку с большим моментом инерции. Гистерезисные СД, напротив, способны втягивать в синхронизм значительные маховые массы, но имеют низкий коэффициент мощности и склонны к качаниям. Стремление устранить недостатки одних СД за счет достоинств других привело к созданию двигателей с комбинированными роторами. Однако серийно такие двигатели не выпускаются.

Механические свойства СД характеризуются тремя вращающими моментами: пусковым $M_{пуск}$, развиваемым при пуске; моментом входа в синхронизм $M_{вх}$ — максимальным моментом нагрузки, при котором ротор еще втягивается в синхронизм; моментом выхода из синхронизма $M_{вых}$ — максимальным моментом при синхронной частоте вращения. Последний момент определяет перегрузочную способность СД.

ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Существуют различные типы синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), отличающиеся способом пуска, конструктивным исполнением, способом питания обмоток статора и т. п.

Наиболее перспективными в электроприводах с относительно высокими скоростями являются СДПМ с асинхронным пуском. В зависимости от взаимного расположения на роторе постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки СДПМ подразделяются на двигатели с аксиальным (рис. 30.22, *а*), радиальным (рис. 30.22, *б*) и тангенциальным (рис. 30.22, *в*) расположением системы возбуждения и пускового устройства. Двигатели аксиальной конструкции применяются при часто встречающихся на практике ограничениях по внешнему диаметру, когда выполнение лучшей в электромагнитном отношении радиальной конструкции затруднительно. Двигатели радиальной конструкции отличаются от двигателей с электромагнитным возбуждением тем, что для предохранения магнитов от размагничивания полем статора полюсная система ротора выполняется с малым зазором между соседними полюсными башмаками. В двигателях тангенциальной конструкции (с ротором коллекторного типа) магнитный поток концентрируется в клинообразных полюсах-сегментах, что позволяет значительно повысить индукцию в рабочем зазоре многополюсных ($2p \geq 4$) СДПМ.

При пуске СДПМ результирующий асинхронный момент $M_{а.рез}$ складывается из асинхронного момента $M_а$, тормозного момента $M_т$, обусловленного наличием постоянно включенного возбуждения, и момента M_{dq}, обусловленного магнитной и электрической несимметрией ротора по продольной и поперечной осям. При достижении ротором подсинхронной скорости двигатель втягивается в синхронизм и работает на угловой характеристике (рис. 30.23). Вращающий момент СДПМ в синхронном режиме $M_с$ состоит из двух составляющих: основного момента $M_о$, обусловленного взаимодей-

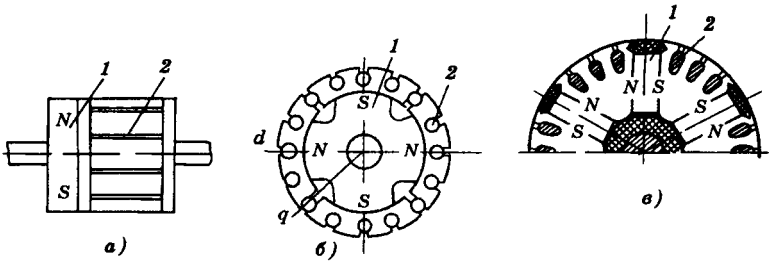


Рис. 30.22. Конструктивные схемы роторов СДПМ

а — аксиальная; *б* — радиальная; *в* — тангенциальная; *1* — постоянные магниты; *2* — пусковая обмотка

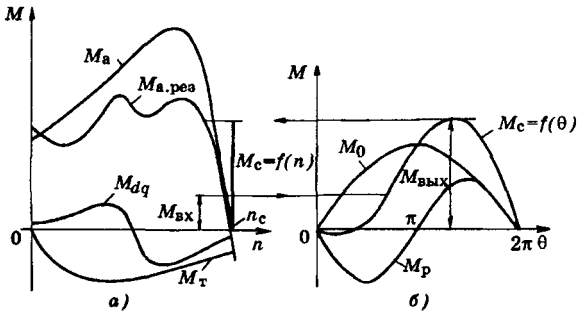


Рис. 30.23. Механические (*а*) и угловые (*б*) характеристики СДПМ

ствием магнитов с полем статора, и реактивного момента $M_р$, обусловленного явнополюсностью ротора. В силу малой магнитной проводимости магнитов в СДПМ $X_d < X_q$ и реактивный момент отрицателен в зоне малых углов нагрузкн θ.

Спроектированные на базе статоров АД СДПМ при работе на малоинерционную нагрузку имеют более высокие энергетические показатели при одинаковой с АД номинальной мощности. Основные технические данные СДПМ малой мощности приведены в табл. 30.12. Двигатели серии ДС универсальные, т. е. могут питаться от трехфазной сети (данные в числителе) и однофазной сети при помощи конденсатора (данные в знаменателе).

РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Отличительной особенностью синхронных реактивных двигателей (СРД) всех типов является отсутствие на явнополюсном роторе какой-либо системы возбуждения Ферромагнитный явнополюсный ротор всегда стремится занять по отношению к полю статора положенне, соответствующее максимальной магнитной проводнмости. Поскольку поле

Таблица 30.12. Основные технические данные синхронных микродвигателей

Тип двигателя	$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	КПД, %	cos φ, отн. ед.	Масса, кг
С постоянными магнитами на частоту 50 Гц							
ДС	1,5÷30 / 1÷25	220	0,07÷0,31 / 0,08÷0,31	1,5	10÷56 / 8÷49	0,44÷0,62 / 0,72÷0,82	0,5÷2,5
СДМ*	6÷180	36	0,41÷5,8	1,5	36÷75	0,49÷0,66	—
Реактивные на частоту 50 Гц							
СОД*	55	220	1,2	1,5	45	0,3	6,4
СД**	10	127÷220	0,22÷0,38	3,0	28	0,77	1,9
Гистерезисные на частоту 50, 400, 500 Гц							
Г	3,5÷60 / 2÷9	40÷220 / 115÷220	0,2÷2,5 / 0,2÷0,4	3÷7,5 / 3÷8	14÷44 / 7÷39	0,3÷0,46 / 0,6÷0,8	0,3÷4 / 0,3÷1,8
ГТ	1,2÷120 / 0,6÷8	36÷220 / 36÷115	0,14÷2,0 / 0,15÷0,7	6÷12 / 8÷12	16÷67 / 8÷27	0,24÷0,5 / 0,6÷0,8	0,15÷3,7 / 0,15÷1,0

* Питаются от трехфазной сети.
** Питаются от однофазной сети.

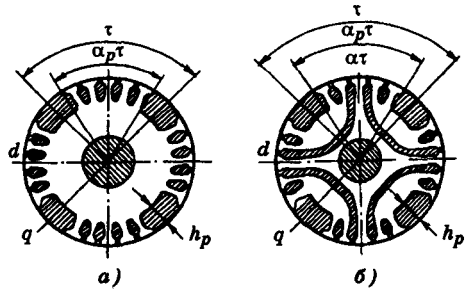


Рис. 30.24. Конструктивные схемы роторов СРД
а — с внешними вырезами; *б* — с внутренними вырезами

статора вращается, то для обеспечения условий образования однонаправленного синхронного момента и втягивания ротора в синхронизм необходимо разогнать ротор до скорости, близкой к синхронной.

В качестве пускового устройства чаще всего в СРД применяется расположенная на роторе короткозамкнутая обмотка. Поэтому отличие ротора СРД от ротора АД состоит лишь в наличии межполюсных впадин-вырезов, с помощью которых образуется явновыраженные полюса (рис. 30.24, *а*). В современных двигателях коэффициент полюсной дуги $\alpha_p = b_p/\tau = 0{,}5 \div 0{,}6$ (b_p — ширина полюса; τ — полюсное деление), а коэффициент впадины $k_в = h_p/\delta = 10 \div 12$ (h_p — глубина впадины, δ — зазор над полюсом). В последние годы разницу магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям СРД осуществляют также за счет внутренних вырезов в листах стали ротора (рис. 30.24, *б*). Наличие вырезов увеличивает результирующий воздушный зазор в СРД по сравнению с АД, приводит к возрастанию необходимого для создания магнитного поля реактивного тока статора и как следствие к снижению коэффициента мощности ($\cos\varphi < 0{,}6$) и КПД ($\eta < 50\%$).

Поскольку СРД не содержит системы возбуждения, в пусковой механической характеристике отсутствует тормозной момент, а максимум синхронного момента имеет место при углах нагрузки $\theta \leq \pi/4$. В отличие от СДПМ у СРД $X_d > X_q$ и в диапазоне углов нагрузки $0 < \theta < \pi/2$ реактивный синхронный момент положителен. Мощность СРД, выполненных в габаритах АД, составляет 40÷60% от мощности АД.

Основные технические данные некоторых типов СРД приведены в табл. 30.12. Двигатель типа СОЛ трехфазный, типа СД — с рабочим конденсатором.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронные гистерезисные двигатели (СГД) имеют цилиндрический ротор, содержащий сплошной или шихтованный активный слой, выполненный из магнитотвердого материала. В отлнчие от СДПМ, в которых магнитотвердый материал (магниты) намагничивается заранее в специальных установках, в СГД намагничивание активного слоя

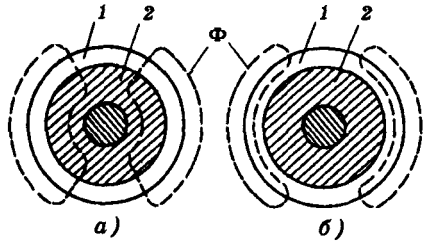


Рис. 30.25. Конструктивные схемы роторов СГД
а — с магнитной втулкой; *б* — с немагнитной втулкой; *1* — активный слой; *2* — втулка

осуществляется полем статора в процессе работы двигателя. При малой магнитной проницаемости магнитотвердого материала кольца активного слоя размещают на магнитной втулке, при большой — на немагнитном цилиндре (рис. 30.25).

Основной (гистерезисный) момент $M_г$ в СГД образуется за счет взаимодействия вращающегося поля статора с полем магнитотвердого материала ротора. Кроме основного момента в СГД при пуске создается асинхронный момент $M_{в.т}$, обусловленный взаимодействием вращающегося поля статора с наведенными нм вихревыми токами в теле ротора (рис. 30.2б). Вследствие большого активного сопротивления гистерезисного слоя момент $M_{в.т}$ достигает максимума при $s_{кр} >> 1$. Поскольку гистерезисный момент $M_г$ существует при любой частоте вращения ротора, СГД способны плавно втягивать в синхронизм большие маховые массы. В синхронном режиме СГД подобны СДПМ. Из-за малой магнитной проницаемости гистерезисного слоя СГД имеют низкие значения коэффициента мощности ($\cos\varphi < 0{,}5$) и КПД ($\eta < 60\%$). Энергетические показатели СГД могут быть значительно повышены путем подмагничивания ротора в синхронном режиме посредством кратковременного увеличения подводимого к статору напряжения. Поскольку в СГД отсутствует короткозамкнутая обмотка на роторе, они склонны к качаниям при изменении режима работы.

Основные технические данные некоторых серий СГД приведены в табл. 30.12. Сернйные СГД выпускаются как в трехфазном (данные в числителе), так и в однофазном (данные в знаменателе) исполнениях на промышленную частоту (50 Гц) и повышенные частоты (400, 500 и 1000 Гц).

Более подробно сведения о синхронных микродвигателях приведены в [30.1÷30.3, 30.9÷30.12].

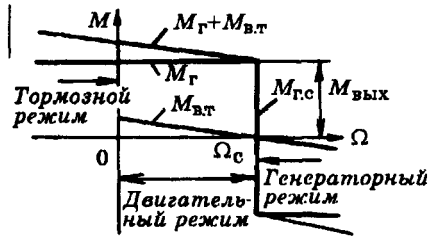


Рис. 30.26. Механические характеристики СГД

30.7. ТИХОХОДНЫЕ СИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В схемах автоматики часто возникает потребность в тихоходном электроприводе. Проблема получения низких частот вращения решается в большинстве случаев применением механических редукторов. Однако при таком решении снижаются КПД привода и его надежность, увеличиваются габариты и масса, ухудшаются виброакустические показатели. В связи с этим маломощный тихоходный привод в ряде случаев выполняют на основе специальных двигателей: многополюсных, работающих на зубцовых гармониках магнитного поля; с катящимся или волновым роторами; с полупроводниковым низкочастотным коммутатором. Использование указанных типов тихоходных двигателей позволяет либо полностью отказаться от механнческого редуктора, либо значительно снизнть его передаточное число.

МНОГОПОЛЮСНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Увеличение числа полюсов в двигателях классической конструкции связано с увеличением диаметра статора. Во избежаиие этого в микродвигателях применяют конструкцию статора с когтеобразными полюсами. Последние получаются путем неполной выштамповки и отгибки клювообразных частей в подшипниковых щитах, выполненных из магнитомягкой стали и являющихся частями магнитопровода (рис. 30.27). Полюсная система статора охвачена кольцевой обмоткой возбуждения. Для создания вращающегося поля либо используется экранирование частн полюсов статора короткозамкнутыми витками, либо применяются два работающих на общий ротор статора, когтеобразные полюсные системы которых смещены одна относительно другой в тангенциальном направлении на электрический угол 90° и в одну из кольцевых обмоток включен фазосдвигающий элемент (конденсатор). Ротор многополюсных двигателей может быть реактивного типа, гистерезисного или с постоянными магнитами. Основным недостатком многополюсных двигателей с постоянными магнитами является то, что, не имея пусковых устройств, они способны втягивать в синхронизм нагрузку с малым моментом инерции.

Основные технические данные однофазных двигателей при частоте 50 Гц приведены в табл. 30.13. Роторы всех типов двигателей выполнены с постоянными магнитамн с числом пар полюсов $2p = 16$. В настоящее время многополюсные микродвигатели находят широкое применение в регистрирующих и самопишущих приборах, реле времени, счетчиках, различного рода программных механизмах.

ДВИГАТЕЛИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РЕДУКЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Двигатели с электромагнитной редукцией частоты вращения, называемые еще редукторными двигателями (РД), являются по существу синхронными индукторными машинами, работающими на зубцовых гармониках магнитного поля. Отличительной особенностью всех типов РД является наличие на роторе открытых пазов z_r; пазы статора z_s могут быть открытыми и полузакрытыми. В общем случае в пазах статора РД располагают две трехфазные или двухфазные обмотки с числами пар полюсов p

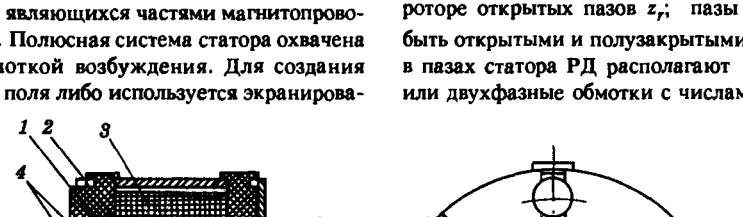


Рис. 30.27. Конструкция СД типа ДСО с когтеобразными полюсами на статоре
1 — полюсы; *2* — постоянный магнит; *3* — кольцевая обмотка статора; *4* — короткозамкнутые экранирующие пластины

Таблица 30.13. Основные технические данные многополюсных двигателей

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$n_{вала}$, об/мин	$M_{ном}$, мН·м	$P_{потр}$, Вт	Масса, кг
Без механического редуктора						
ДСМ	12÷220	375	375	0,8	3	0,13
ДСО	12÷220	375	375	1,0	2	0,065
ДСК	12÷220	375	375	2,5÷16	2÷6	0,07÷0,17
С механическим редуктором						
ДСОР	12÷220	375	1/300÷72	3,2÷300	2,7	0,17÷0,19
ДСКР	12÷220	375	1/300÷60	4÷2000	2,5÷7	0,17÷0,3

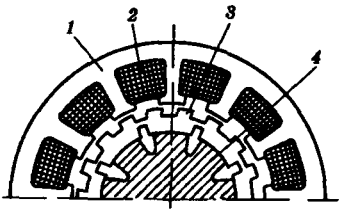


Рис. 30.28. Конструкция РД с радиальным возбуждением

1 — сердечник статора; *2* — обмотка статора; *3* — зубчатый венец ротора; 4 — постоянный магнит

и p', питаемые от источников с частотами f и f'. Эти обмотки создают магнитные поля, содержащие высшие гармоники. В РД в качестве рабочих гармоник выбирают зубцовую гармонику обмотки с числом пар полюсов p порядка $\nu_{zs} = z_s \pm p$ и зубцовую гармонику обмотки с числом пар полюсов p' порядка $\nu_{zr} = z_r \pm p'$. Для образования однонаправленного вращающего момента необходимо, чтобы частоты вращения указанных гармоник были одинаковыми. Это условие выполняется при частоте вращения ротора $n = 60(f \pm f')/z_r = 60(f \pm f')/(z_s \pm p \pm p')$. В зависимости от соотношения чисел пар полюсов и питающих частот РД подразделяют на следующие типы.

1. Двигатели двойного питания. В этом случае при близких частотах f и f' возможно получение очень малых (ползучих) частот вращения.

2. Двигатели с радиальным возбуждением, в которых $f' = 0$ — обмотка с числом пар полюсов p' питается постоянным током. В случае самовозбуждения обмотка p' замыкается накоротко через диоды. ЭДС в обмотке с числом пар полюсов p' наводится за счет трансформаторной связи с обмоткой с числом пар полюсов p. В случае замены обмотки с числом пар полюсов p' постоянными магнитами последние могут размещаться на роторе (рис. 30.28). Частота вращения ротора РД данного типа $n = 60f/z_r = 60f/(z_s \pm p \pm p')$, коэффициент редукции $k_{\text{ред}} = z_r/p$.

3. Двигатели с осевым (униполярным) возбуждением имеют либо обмотку возбуждения постоянного тока, либо постоянные магниты, создающие в рабочем зазоре униполярное поле (рис. 30.29). Частота вращения ротора в этом случае $n = 60f/z_r = 60f/(z_s \pm p)$, коэффициент редукции $k_{\text{ред}} = z_r/p$.

4. Реактивные двигатели имеют на статоре только одну обмотку. Эту обмотку можно рассматривать как состоящую из двух совмещенных при $p = p'$ и $f = f'$. Частота вращения ротора реактивного РД $n = 120f/z_r = 120f/(z_s \pm 2p)$, коэффициент редукции $k_{\text{ред}} = z_r/(2p)$.

Поскольку РД работают на высших гармониках, они имеют увеличенные габариты и массу, а также низкие энергетические показатели. Кроме того, самозапуск РД возможен лишь при малых моментах инерции нагрузки. Для улучшения пусковых свойств на роторе РД размещают короткозамкнутую обмотку, имеющую большое активное сопротивление ($s_{\text{кр}} > 2$).

Основные технические данные некоторых типов РД приведены в табл. 30.14. Указанные двигатели питаются от сетей промышленной частоты напряжением 220 В. Однофазные двигатели типа ОРД имеют статор с экранированными полюсами. Двигатели серии ДСР могут работать как однофазные конденсаторные (данные в числителе) и как трехфазные (данные в знаменателе).

Таблица 30.14. Основные технические данные РД

Тип двигателя	$M_{\text{ном}}$, Н·м	$n_{\text{вала}}$, об/мин	$M_{\max}$, Н·м	$I_{\text{ном}}$, А	КПД, %	$\cos\varphi$, отн. ед.	Масса, кг
ОРД-60	0,01	60	0,014	0,07	6	0,65	0,45
ОРД-1	0,6	1	0,72	0,1	41	0,65	0,6
ДСР-60	0,01 / 0,015	60	0,02 / 0,03	0,08 / 0,06	25 / 58	0,96 / 0,85	0,7
ДСР-2	0,1 / 0,2	2	0,2 / 0,25	0,08 / 0,06	12 / 21	0,96 / 0,85	0,7
ДСР-115	0,6	115	0,7 / 1,3	0,53	11 / 18	0,56	5

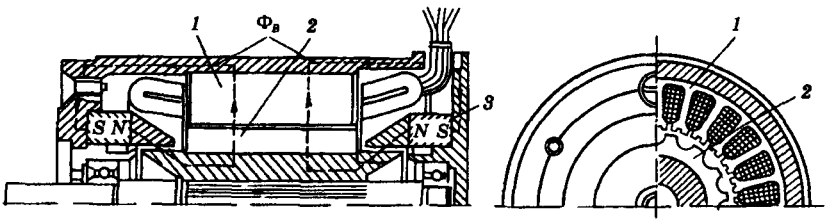


Рис. 30.29. Конструкция РД с униполярным возбуждением

1 — статор; *2* — ротор; *3* — постоянный магнит

ДВИГАТЕЛИ С КАТЯЩИМИСЯ И ВОЛНОВЫМИ РОТОРАМИ

Отличительной особенностью двигателей с катящимся ротором (ДКР) является эксцентричное расположение беспазового ферромагнитного ротора по отношению к статору. Вращающий момент в ДКР создается за счет воздействия на ротор сил одностороннего магнитного притяжения. Необходимое для работы ДКР несимметричное магнитное поле чаще всего образуют наложением униполярного поля, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами, на двухполюсное вращающееся поле, создаваемое трехфазной или двухфазной обмоткой статора (рис. 30.30). Обкатывание ротором статора осуществляют при помощи катков и направляющих. Обкатывание может происходить по внутреннему или наружному диаметру направляющих. В обоих случаях точка соприкосновения катков и направляющих перемещается синхронно с полем Вал же ротора при наружном обкатыванин вращается в сторону вращения поля, а при внутреннем — в противоположном направлении. Частота вращения $n = n_c(D_к - D_н)/D_к$, где $D_к$ и $D_н$ — диаметры катков и направляющих. Таким образом, в ДКР осуществляется редукция частоты вращения вала с коэффициентом редукции $k_{ред} = D_к/(D_н - D_к)$.

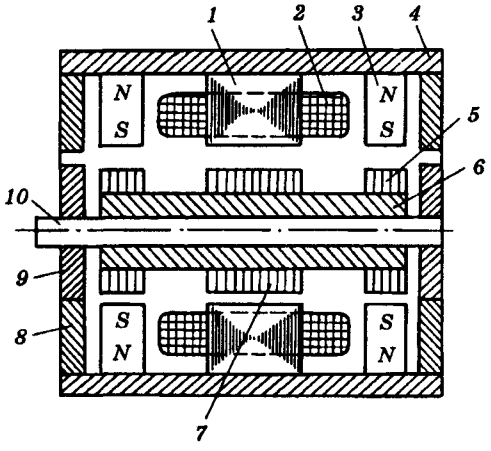


Рис. 30.30. Конструктивная схема ДКР

1 — сердечник статора; *2* — обмотка статора; *3* — постоянный магнит; *4* — внешний магнитопровод; *5* — тороиды; *6* — магнитная втулка; *7* — сердечник ротора; *8, 9* — катки; *10* — вал

Основным недостатком ДКР является сложность передачи вращения от нефиксированного вала к нагрузке. На практике такая передача производится при помощи эластичных муфт и различного рода гибких устройств. Энергетические показатели ДКР зависят от частоты вращения ротора. При низких частотах вращения ($n = 2 \div 10$ об/мин) КПД двигателей не превышает 5%, при относительно высоких ($n = 100 \div 200$ об/мин) — 40%. Коэффициент мощности зависит от степени возбужденности ДКР униполярным потоком и колеблется в широких пределах ($\cos\varphi = 0{,}2 \div 0{,}8$). Кратность пусковых токов в ДКР невелика $k_I \leq 2 \div 3$.

Разновидностью ДКР являются двигатели с волновым гибким ротором. Особенность таких двигателей состоит в том, что их ротор может деформироваться под действием сил магнитного тяжения (рис. 30.31). При питании обмотки статора волна деформации перемещается синхронно с полем. При этом происходит обкатывание гибким венцом ротора жесткого венца статора с частотой вращения $n = n_c(z_r - z_s)/z_r$. Вращение ротора передается на вал двигателя через зубчатую передачу. Волновые двигатели в отличие от ДКР более сбалансированы и имеют меньший уровень звука и вибраций. Однако технологические и конструктивные трудности, связанные с налнчием деформируемого ротора и эластнчной зубчатой передачи, ограннчивают их примененне.

Более подробно сведения о тихоходных синхроиных микродвигателях приведены в [30.1, 30.5, 30.9, 30.11].

30.8. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Коллекторные двигатели малой мощности постоянного и переменного тока находят широкое применение в схемах автоматикн благодаря возможности получення высоких частот вращения (до 20 000 об/мин н выше) и регулнрования в широком диапазоне угловой скоростн ротора. Кроме того, коллекторные мнкродвигателн нмеют малую массу и объем на

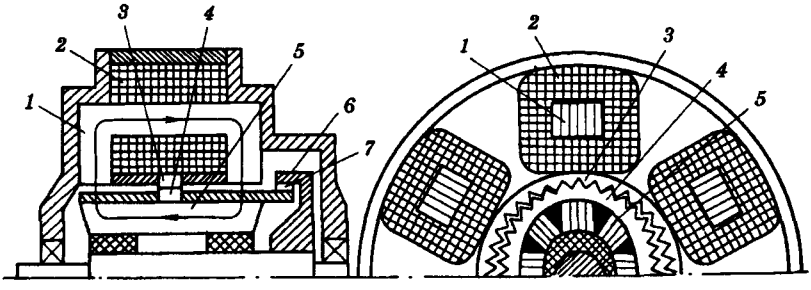


Рис. 30.31. Конструкция двигателя с волновым гибким ротором

1 — сердечник статора; *2* — обмотка статора; *3, 4* — зубчатые эластичные венцы; *5* — сердечник ротора; *6, 7* — зубчатая передача

Таблица 30.15. Основные технические данные микродвигателей постоянного тока

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	$M_{ном}$, мН·м	$I_{ном}$, А	КПД, %	Масса, кг
С параллельным возбуждением							
ПЛ	110÷220	30÷600	1,4÷2,7	110÷3·10³	0,34÷5	40÷72	2÷12,6
С последовательным возбуждением							
СЛ	110÷127	5,5÷170	3÷5	18÷280	0,2÷1,5	15÷60	0,5÷5,3
С постоянными магнитами							
ДПМНЗ	12÷28	0,62÷6,5	4,5÷12	1÷6,86	0,24÷1,25	6÷24	0,075÷0,25
КЛ	0,9÷9	0,02÷8	1,5÷12	0,01÷3,5	0,015÷0,29	—	0,004÷0,09

единицу полезной мощности и более высокий КПД по сравнению с АД и СД.

По конструкции коллекторные микродвигатели аналогичны двигателям постоянного тока средней и большой мощности (см. разд. 28). В отличие от последних в них отсутствуют дополнительные полюса и компенсационные обмотки; при электромагнитном способе возбуждения их магнитопровод (включая станину и полюса) обычно выполняют из листов электротехнической стали. По способу возбуждения коллекторные микродвигатели разделяются на двигатели с параллельным (независимым), последовательным возбуждением и двигатели с постоянными магнитами. Независимо от конструктивного исполнения, способа возбуждения и рода тока вращающий момент в коллекторных двигателях образуется за счет взаимодействия магнитного потока полюсов с током обмотки якоря ($M \sim \Phi_в I_a$). Регулирование частоты вращения осуществляется изменением либо напряжения питания, либо тока возбуждения либо введением в цепь якоря дополнительного резистора.

Основным недостатком коллекторных микродвигателей является наличие щеточно-коллекторного узла, что ограничивает их долговечность и использование во взрывоопасных средах. Вследствие искрения на скользящем контакте эти двигатели являются источником радиопомех, для подавления которых обычно применяются специальные фильтры.

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Микродвигатели постоянного тока независимо от способа возбуждения могут выпускаться без стабилизатора и со стабилизатором частоты вращения. Двигатели с центробежно-вибрационными регуляторами обеспечивают стабилизацию частоты вращения с точностью ±5%. Более точная стабилизация (до ±0,5%) может быть достигнута применением электронных регуляторов.

Механические характеристики микродвигателей при параллельном (независимом) возбуждении и возбуждении от постоянных магнитов практически линейны, так как магнитопровод выполняется обычно ненасыщенным. *Микродвигатели последовательного* возбуждения имеют нелинейную мягкую механическую характеристику, но наилучшую добротность пуска (отношение пускового момента к пусковому току). Их добротность в 1,5÷3 раза выше, чем у других двигателей, поэтому они применяются при тяжелых условиях пуска. Двигатели с постоянными магнитами не имеют потерь на возбуждение, вследствие чего их КПД выше, чем у двигателей с электромагнитным возбуждением.

Основные технические данные наиболее распространенных серий микродвигателей постоянного тока приведены в табл. 30.15. Двигатели серии ПЛ имеют параллельное возбуждение. Двигатели серии СЛ выпускаются как с параллельным (см. табл. 30.2), так и с последовательным (табл. 30.15) возбуждением. Двигатели серии ДПМ с возбуждением от постоянных магнитов выпускаются как без регулятора (см. табл. 30.2), так и с регулятором (табл. 30.15) частоты вращения. Миниатюрные двигатели с постоянными магнитами серии КЛ могут выполняться с встроенными тахогенераторами или механическими редукторами.

ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для получения однонаправленного вращающего момента необходимо, чтобы ток возбуждения (магнитный поток) и ток якоря изменяли свой знак одновременно. Поэтому коллекторные двигатели переменного тока выполняются с последовательным возбуждением. Конструктивным отличием таких двигателей является то, что их станина и полюса всегда набираются из листовой стали.

Поскольку токи возбуждения и якоря изменяются во времени, вращающий момент M не остается постоянным (рис. 30.32). В отдельные моменты времени он даже становится отрицательным из-за отставания потока от тока на угол β, обусловленный потерями в стали. Однако вследствие большой час-

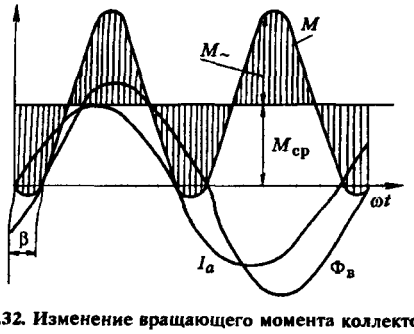


Рис. 30.32. Изменение вращающего момента коллекторного двигателя переменного тока во времени

Таблица 30.16. Основные технические данные серий УКД

Тип двигателя	$U_{ном}$, В	$P_{ном}$, Вт	$n_{ном}$, 10^3 об/мин	$I_{ном}$, А	КПД, %	$\cos\varphi$, отн. ед.	Масса, кг
УЛ	110÷220	5÷600	2,7÷8	0,14÷8,6	25÷65	0,82÷0,9	0,42÷12,6
УВ	110÷220	5÷550	5÷14	0,1÷5,7	24÷70	0,8÷0,9	0,3÷3,8
УМТ	110÷220	5÷55	1,8÷3	0,25÷1,5	22÷57	0,47÷0,78	1,5÷4,5
СЛ	110÷127	5,5÷44	2÷4,3	0,35÷1	33÷55	—	0,9÷2,2

тоты пульсаций момента ($f_M = 2f_1$), где f_1 — частота питающего напряжения, и значительного момента инерции вращающихся масс непостоянство вращающего момента практически мало ощутимо. Двигатель развивает на валу момент, равный среднему значению момента $M_{ср}$ за период его изменения.

По своим механическим и рабочим характеристикам коллекторные двигатели переменного тока напоминают двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением, но несколько уступают последним по своим энергетическим показателям вследствие повышенных электрических и магнитных потерь. Серьезным недостатком коллекторных двигателей переменного тока является повышенное искрение под щетками. Ухудшение коммутации объясняется тем, что в коммутируемой секции наводится еще (кроме ЭДС вращения и реактивной ЭДС) ЭДС трансформации. Несмотря на указанные недостатки, коллекторные двигатели переменного тока находят широкое применение, так как позволяют получать при промышленной частоте весьма высокие частоты вращения (до 20 000 об/мин и выше). Часто такие двигатели выполняются универсальными.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Универсальными коллекторными двигателями (УКД) называют микродвигатели, способные работать как от сети постоянного тока, так и от однофазной сети промышленной частоты. Отличительной особенностью УКД является то, что их обмотка возбуждения выполняется секционированной, т. е. имеет дополнительные выводы (рис. 30.33). При постоянном токе под напряжение включается вся обмотка возбуждения, при переменном — лишь ее часть. Если бы при переменном токе использовалась вся обмотка возбуждения, то двигатель вследствие влияния индуктивных сопротивлений обмоток якоря и возбуждения развивал бы меньшие моменты при одинаковых с двигателем постоянного тока частотах вращения. Уменьшение числа витков обмотки возбуждения при переменном токе позволяет сместить механическую характеристику УКД в сторону больших частот вращения. Такое смещение позволяет получать одинаковые моменты и мощности на переменном и постоянном токе при номинальной частоте вращения. При всех других частотах вращения рабочие свойства УКД на переменном токе хуже, чем на постоянном.

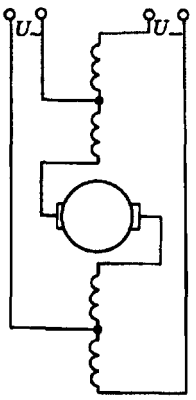


Рис. 30.33. Схема включения УКД в сеть постоянного и переменного тока

Основные технические данные некоторых серий УКД приведены в табл. 30.16.

Более подробные сведения о коллекторных микродвигателях приведены в [30.1, 30.3, 30.5, 30.12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

30.1. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1988.

30.2. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

30.3. Справочник по электрическим машинам. Т. 2 / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1989.

30.4. Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматикн. М · Высшая школа, 1988.

30.5. Микроэлектродвигатели для систем автоматики: Справочник / Под ред. Э.А. Лодочникова н Ф.М. Юферова. М.: Энергия, 1969.

30.6. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под ред. М.Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971.

30.7. Ахметжанов А.А. Высокоточные системы передачн угла автоматических устройств. М.: Энергия, 1975.

30.8. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асннхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980.

30.9. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985.

30.10. Осин И.Л., Колесников В.П., Юферов Ф.М. Синхронные микродвигатели с постояннымн магнитами. М.: Энергия, 1976.

30.11. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. Синхронные машины / Под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1990.

30.12. Электротехнический справочник. Т. 2 / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, В.А. Лабунцова и др. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Раздел 31

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

СОДЕРЖАНИЕ

31.1. Общие сведения. 291
31.2. Основные виды электрических аппаратов. 293
Назначение и классификация электрических аппаратов высокого напряжения (АВН) (293). Назначение и классификация электрических аппаратов управления и распределительных устройств низкого напряжения (295). Назначение и классификация электрических аппаратов автоматики (296).
31.3. Основные физические явления и процессы в электрических аппаратах . . . 296
Список литературы 300

31.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическими аппаратами (ЭА) называются электротехнические устройства для управления потоками энергии и информации, режимами работы, контроля и защиты технических систем и их компонентов [31.1 31.4]. Электрические аппараты в зависимости от элементной базы и принципа действия разделяются на две группы: *электромеханические и статические.* Основным признаком электромеханических аппаратов является наличие в них подвижных частей. У многих типов электромеханических аппаратов одной из подвижных частей является контактная система, осуществляющая коммутацию электрической цепи. Статические аппараты выполняются на основе электронных компонентов (диодов, тиристоров, транзисторов и др.), а также управляемых электромагнитных устройств (магнитных усилителей, дросселей насыщения и др.). Аппараты этого вида, как правило, относятся к силовым электронным устройствам, так как обычно используются для управления потоками электрической энергии, а не информации.

Существуют также *гибридные электрические аппараты*, представляющие собой комбинацию электромеханических и статических аппаратов.

В основе функционирования большииства видов ЭА лежат процессы коммутации (включения и отключения) электрических цепей. К таким ЭА относятся: автоматические выключатели, контакторы, реле, кнопки управления, тумблеры, переключатели, предохранители и др.

Другую многочисленную группу ЭА, предназначенных для управления режимами работы и защиты электротехнических систем и компонентов, составляют регуляторы и стабилизаторы параметров электрической энергии (тока, напряжения, мощности, частоты и др.), а также ограничители перенапряжений и сверхтоков. Электрические аппараты этой группы функционируют на основе непрерывиого или импульсного изменения проводимости электрических цепей. Обычно они выполняются на базе силовых полупроводниковых, электромагнитных и других видов иелинейных элементов.

К ЭА управления режимами работы неэлектрических систем относятся устройства, функционирующие, как правило, на основе электромагнитного, электродинамического и других видов привода, связанного с механическим исполнительным органом. Примерами этой группы ЭА являются электромагнитные муфты, электромагнитные клапаны и заслонки трубопроводов, подвесы, опоры, вибрационные устройства с управлением по определенным законам и др. Для ЭА этой группы характерно управление потоками механической, гидравлической, тепловой и других видов энергии.

Традиционно к ЭА также относят различные виды датчиков, имеющих законченное конструктивное исполнение. Назначением большинства датчиков, относящихся к ЭА, является преобразование параметров различных по природе физических величин в электрические сигналы информациоиного характера. Такие датчики широко используются в различных системах автоматического управления. В качестве датчиков электрических величин широко используются маломощные трансформаторы тока и напряжения, иазываемые в этом случае измерительными.

Иногда к ЭА относятся различные конструктивно законченные электротехнические компоненты, например электрические разъемы, а также электромеханические устройства специального назначения: пускорегулирующие аппараты светотехники, геиераторы импульсов специальной формы, блоки контроля параметров сетевого напряжения и др.

В основу классификации ЭА могут быть положеиы различные принципы. Обычно в качестве классификационных признаков и показателей используются: зиачения рабочих напряжений и токов, род тока, принцип действия, конструктивное исполнение, особенности эксплуатации, иазначение и др.

Области применения и использования ЭА очень разиообразны: электроэнергетика, промышлениость, транспорт, аэрокосмические системы, центры обработки информации и телекоммуникации, коммунальиое хозяйство, бытовая техника и др. При этом в каждой из областей диапазои используемой номеиклатуры ЭА очень широкий. Можно без преувеличения сказать, что не существует ни одной области, связанной с использованием электрической энергии, где бы ие применялись ЭА.

Приведем некоторые характерные примеры их применения.

В электроэнергетике включение и отключение высоковольтных линий электропередачи, связывающих первичные источники электроэиергии с многочисленными потребителями, включаемых через промежуточные электрические подстанции, осуществляется исключительно высоковольтными автоматическими выключателями. При этом в состав электрооборудования электрических подстанций входят различные виды нелинейных ограничителей перенапряжений, токоограиичивающих реакторов для эиергосистем, применяемые в аварийных режимах, вызванных короткими замыканиями и воздействиями грозовых разрядов. Кроме того, в состав этого оборудования входят многочисленные разъединители, высоковольтные предохранители, высоковольтиые измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Распределение электроэнергии по потребителям промышленных объектов и коммунального хозяйства на стороне низкого напряжения также осуществляется многочислениыми автоматическими выключателями и контакторами, обычно конструктивно объединенными различными распределительными устройствами электрических подстанций.

Управление состояиием автоматических выключателей и коитакторов осуществляется различиыми видами реле и командоаппаратами пунктов управления. Совокупность различиых типов реле лежит также в основе систем релейной защиты.

Большую часть электроэнергии в промышленности и на транспорте потребляет электропривод на основе электродвигателей переменного и постоянного тока. Управление режимами работы и защита электродвигателей осуществляется различными видами ЭА. Так, например, для управления и защиты электропривода на осиове асинхронного двигателя обычно используется свыше десяти видов ЭА: автоматические выключатели, коитакторы, реле, предохранители, датчики и др. В современном электроприводе начинают играть большую роль силовые электронные и гибридные аппараты, которые обеспечивают регулирование параметров двигателя в различных режимах его работы. Для этого начинают широко использовать ЭА в виде «разумных» силовых электронных модулей, включающих в себя как силовые полупроводниковые приборы, так и микроэлектронные схемы различной степени интеграции, включая микропроцессоры.

Для регулирования значений иапряжения и тока в настоящее время эффективно используются импульсные электронные регуляторы и быстродействующие магнитные ключи. Эти виды ЭА, включая разнообразные датчики, наиболее широко применяются в системах автономного электроснабжения как наземных, так и аэрокосмических систем.

Для систем автоматики и управления создана широкая номенклатура слаботочиых коитактных и электронных реле, а также комаидоаппаратов, в частности, сенсорного типа.

Здесь приведены только отдельные примеры конкретных видов ЭА, показывающие обширность областей их применения и разнообразие выполняемых функций. В настоящем Справочнике рассматриваются только основные наиболее широко используемые ЭА

Статические ЭА выполняются на основе полупроводниковых приборов или сочетания последних с управляемыми магнитными компонентами (магнитными усилителями или магнитными ключамн).

Принцип действия большинства статических ЭА основан на изменении проводимости входящих в них управляемых нелинейных элементов. При этом диапазон изменения проводимости может быть очень широким. Широкий диапазон изменения проводнмости имеют также и магнитные ключи.

Изменение проводимости статических ЭА, в свою очередь, дает возможность управлять потоками электрической энергии. Например, таким способом можно регулировать ток, а следовательно, и потребляемую мощность нагрузки в электрической системе с напряжением стабильного значения. Проводимость может изменяться непрерывно или дискретно. Дискретное, или импульсное, управление является более предпочтительным, так как позволяет реализовать более высокие технико-экономические характеристики ЭА и, в частиости, получать существенно лучшие значения КПД. Поэтому в современных статических ЭА исполнительные органы работают в ключевом режиме.

В качестве силовых полупроводниковых ключей статических ЭА обычно используются силовые транзисторы и тиристоры. В отдельных видах регуляторов могут эффективно применяться и магнитные ключи.

Основным преимуществом статических ЭА по сравнению с электромеханическими видами являются:

быстродействие;

практически неограниченное число коммутаций силовых ключей;

существенно больший ресурс работы;

более широкие возможности по управлению выходными параметрами;

низкое значение мощности, затрачиваемой на управление;

большие функциональные возможности.

Эти преимущества делают некоторые внды статических ЭА, например регуляторы, вне конкуренции с электромеханическими.

С другой стороны, электромеханические ЭА имеют следующие явные преимущества:

более низкое (на несколько порядков) значение сопротивления включенных контактов по сравнению с сопротивлением большинства проводящих полупроводниковых ключей;

практически идеальная гальваническая развязка между цепями управления и силовой частью, а также между разомкнутыми силовыми цепями;

работоспособность при более высоких значениях температуры и радиации окружающей среды.

Благодаря этим преимуществам во многих областях техники предпочтительно использование электромеханических ЭА коммутации по сравнению со статическими.

Компромиссным техническим решением является создание гибридных ЭА, представляющих собой сочетание электромеханических и статических ЭА. Существенным преимуществом гибридных ЭА коммутации является практическое исключение дуговых явлений при включеиии и выключении электрических контактов. Это позволяет продлить срок их службы и в ряде случаев улучшить массогабаритные показатели ЭА в целом. Другим существенным достоинством гибридных ЭА является возможность сочетания в одном ЭА функций регулятора на интервалах включения и выключеиия с высокими характеристиками коммутационного аппарата.

31.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по разным признакам, например:

по *напряжению*: низкого (до 1000 В) и высокого (от единиц до тысяч киловольт) напряжения;

значению тока: слаботочные (до 5 А) и сильиоточные (от 5 А до сотен килоампер);

роду тока: постоянного и переменного;

частоте источника питания: с нормальной (до 50 Гц) и повышенной (от 400 Гц до 10 кГц) частотой;

роду выполняемых функций: коммутирующие, регулирующие, коитролирующие, измеряющие, ограничивающие по току или напряжению, стабилизирующие;

исполнению коммутирующего органа: контактные и бесконтактные (статические), гибридные, синхронные, бездуговые.

Многообразие видов классификации определяется областями применения: в схемах автоматического и неавтоматического управления различного электротехнического оборудования; в устройствах автоматического регулирования, стабилизации, контроля и измерения систем распределения электрической энергии и энергоснабжения предприятий электротехиической и многих других отраслей промышленности, связанных с использованием электрической энергии.

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (АВН)

По функциональному признаку АВН делятся на следующие виды:

коммутационные аппараты (выключатели, выключатели нагрузки, разъединители);

измерительные аппараты (трансформаторы тока и напряжения, делители напряжения);

ограничивающие аппараты (предохранители, реакторы, разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений);

компенсирующие аппараты (управляемые и неуправляемые шуитирующие реакторы);

комплектные распределительные устройства.

Коммутационные аппараты служат для распределения энергии, вырабатываемой электростаициями, и передачи ее на дальние расстояния. Они также являются неотъемлемой частью схем электроснабжения потребителей.

Выключатели служат для коммутации (включений и отключеиий) всех токов цепи, возможных в эксплуатации: номинальных, короткого замыкания, емкостных токов длинных линий, конденсаторных батарей и др.

Характерной особенностью выключателей является отключение поврежденного участка в течение единиц полупериодов промышлеииой частоты сети.

Выключатели должны осуществлять многократную коммутацию номинальных токов до 150 000 включений и отключений (ВО) и многократную коммутацию токов короткого замыкания (до 100 ВО).

В настоящее время используются различные типы выключателей.

Масляные выключатели. В этих аппаратах дугогасительное устройство заполнеио трансформаторным маслом. Гашение электрической дуги осуществляется путем эффективного ее охлаждения потоками газа, возникающего при разложении масла дугой.

В настоящее время иаиболее широко распространены маломасляные выключатели на напряжение 10–20 кВ и 110–220 кВ.

Электромагнитные выключатели. На электрическую дугу, возникающую в процессе отключеиия, действует магнитное поле, которое загоияет дугу в керамическую гасительную камеру. Охлаждение дуги в камере создает условия для ее гашеиия. Электромагнитные выключатели выпускаются на напряжение 6–10 кВ.

Воздушиые выключатели. Гашение дуги осуществляется потоком сжатого воздуха. Номинальное напряжеиие до 1150 кВ.

Элегазовые выключатели. Гашение дуги производится либо потоком элегаза, либо путем подъема давления в камере за счет дуги, горящей в замкнутом объеме газа. Применяются на все классы напряжения. Наибольшее напряжеиие на один разрыв выключателя достигает 750 кВ.

Вакуумные выключатели. Контакты расходятся в вакууме. Одноразрывные аппараты применяются при напряжении до 35 кВ.

Выключатели нагрузки — это электрические аппараты, предиазначенные в осиовиом для включения и отключения иагрузочных токов цепей вплоть до номинальных токов (до 1000 А, 10 кВ). Эти аппараты не способны отключать токи КЗ, которые отключаются либо предохранителями, либо другими выключателями, включенными последовательиио с выключателями нагрузки.

Для распределительиых устройств крупиых генераторов создаиы специальные выключатели нагрузки, способные часто включать и отключать токи до 30 кА при напряжеиии 10 кВ.

Разъединители примеияются для коммутации элементов цепи при отсутствии тока. Это позволяет выводить оборудование для ревизии и ремоита (сначала ток отключается выключателем, потом цепь отсоединяется разъединителем). Разъединители могут отключать небольшой ток холостого хода трансформаторов и линий электропередачи.

Измерительные аппараты. Для контроля состояния энергетических систем необходимо непрерывное измерение тока и напряжения. Эту функцию выполняют измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Трансформаторы тока (ТТ) преобразуют измеряемый ток в ток стандартного значения 1—5 А и изолируют цепи измерений и релейной защиты от цепей высокого напряжения. Главное требование к ТТ — малые погрешности в нормальном режиме и при коротких замыканиях.

Наиболее широко используются электромагнитные трансформаторы тока.

Существуют оптоэлектронные трансформаторы тока. Оптоэлектронный датчик тока, расположенный на высоком потенциале, выдает оптический сигнал, модулированный измеряемым током. По оптической линии связи сигнал передается на потенциал «земли», где расположен преобразователь светового сигнала в электрический. Выходной сигнал преобразователя подается на соответствующий усилитель.

Трансформаторы напряжения (ТН) преобразуют измеряемое напряжение в напряжение стандартного значения 100 или $100/\sqrt{3}$ В. Эти аппараты создают необходимую изоляцию между высоким потенциалом первичной обмотки и цепью вторичной обмотки, к которой присоединены измерительные приборы и защитные реле.

В настоящее время разработаны и широко применяются измерительные устройства тока и напряжения, основанные на использовании эффекта Холла.

Ограничивающие аппараты. Различают аппараты ограничения тока (предохранители и реакторы) и аппараты ограничения перенапряжеиий (разрядники и ограничители перенапряжений).

Предохранители служат для защиты силовых трансформаторов, воздушных и кабельных линий, конденсаторов, электродвигателей и трансформаторов напряжения. При наступлении недопустимой перегрузки или аварии сгорает плавкая вставка предохранителя и возникшая при этом дуга гаснет в дугогасительном устройстве.

Различают токоограничивающие предохранители, в которых процесс отключения оканчивается раньше чем ток достигнет максимального (устаиовившегося) значения (номинальное напряжение до 35 кВ), и выхлопные предохранители, в которых дуга гаснет при переходе тока через нуль (номинальное напряжение до 110 кВ).

Токоограничивающие реакторы представляют собой практически чисто индуктивные сопротивления, включаемые последовательно с иагрузкой. В нормальном режиме падение напряжения на реакторе не более 10% номинального напряжения $U_{ном}$. Остальная часть напряжения приложена к нагрузке. При коротком замыкании у потребителя через реактор протекает ток $I_к = U_{ном}/(\sqrt{3}\,X_р)$.

Вследствие значительного сопротивления реактора $X_р$ ток $I_к$ ограничивается до значения, ие опасного для кабеля, и может быть отключен выключателем иебольшой мощности. Благодаря реактору напряжеиие на сборных шинах близко к номинальному значению. Все потребители при этом работают при номинальном напряженин, кроме потребителя, у которого произошло короткое замыкание.

Для ограничения напряжения, появляющегося на АВН при коммутационных и атмосферных перенапряжениях, служат *разрядники и ограничители перенапряжения*. Простейший трубчатый разрядник служит для ограничения перенапряжений на линиях электропередачи и на подходах к подстанциям. Трубчатый разрядник состоит из разрядного промежутка и устройств гашения сопровождающей дуги. Трубчатые разрядники имеют крутую вольт-секундную характеристику, что делает их непригодными для защиты электрооборудования подстанций, имеющего пологую вольт-секундную характеристику.

Вентильный разрядник состоит из искрового промежутка и столба нелинейных резисторов (дисков). При появлении перенапряжений сначала пробивается искровой промежуток и по нелинейиому резистору протекает ток. На изоляцию воздействует напряжение, появляющееся на нелинейном резисторе. Оно должно быть меньше электрической прочности защищаемого оборудования. Дуга сопровождающего тока гасится искровыми промежутками при переходе тока через нуль.

Ограничитель перенапряжений (ОПН) является нелинейным резистором с высокой нелинейностью. Это устройство не имеет искровых промежутков и непосредственно присоединяется параллельно защищаемому объекту. При рабочем напряжении ток через ОПН составляет миллиамперы. При перенапряжениях токи достигают сотен и тысяч ампер. Кратность коммутационных перенапряжений не превышает 1,75; при грозовых перенапряжениях – 2,42.

Компенсирующие аппараты. В сетях высокого и сверхвысокого напряжения широко используются реакторы, включенные между токоведущими элементами и землей (шунтирующие реакторы). Их назначение — компенсация зарядной мощности в режиме малых нагрузок. При номинальном токе они отключены; по мере уменьшения нагрузки они подключаются с помощью высоковольтных выключателей.

Более совершенными являются регулируемые шунтирующие реакторы. Индуктивность их меняется за счет изменения тока подмагничивания или угла открытия тиристоров. Такие реакторы позволяют получить глубокое ограничение перенапряжений.

Распределительные устройства. Совокупность электрических аппаратов, позволяющая распределять электрическую энергию и обеспечивать защиту от аварийных режимов, называется распределительным устройством (РУ). Различают сборные РУ и комплектные распределительные устройства (КРУ).

В первом случае для РУ строится специальное здаиие и все элементы РУ монтируются на стендах или перегородках здания. Это требует больших затрат, квалифицированного труда и времени.

Во втором случае все ячейки КРУ изготавливаются на заводе и собираются в готовое распределительное устройство. Монтаж на месте установки сводится к подключению сборных шин, отходящих кабелей и присоединению к источникам питания приводов выключателей и релейной защиты. Все это требует малых затрат времени.

Выпускаются КРУ, предназначенные для наружной установки (на открытом воздухе) — КРУН.

Создаются также герметизируемые КРУ, заполненные элегазом — КРУЭ. Это позволяет значительно уменьшить габариты и повысить надежность изделия.

В КРУЭ могут использоваться как элегазовые, так и вакуумные выключатели. В последнем случае элегаз обеспечивает изоляцию между токоведущими элементами КРУЭ.

В настоящее время выпускаются КРУЭ на номинальные напряжения 110 и 220 кВ и ведутся работы по созданию КРУЭ на напряжение вплоть до 1150 кВ.

Использование КРУ (особенно КРУЭ) дает возможность резко сократить площадь и объем РУ и ввести высокое напряжение в глубь городов и центров потребления электроэнергии. При этом удается резко увеличить надежность работы энергосистем.

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Аппараты управления предназначены для управления режимом работы электрооборудования и подразделяются на следующие виды: контакторы, пускатели, контроллеры, электрические реле управления, командоаппараты, рубильники, электромагниты управления и электроуправляемые муфты.

Контакторы служат для многократных включений и отключений электрической цепи при токах нагрузки, не превышающих номинальный, а также для редких отключений при токах перегрузки (обычно 7–10-кратных по отношению к номинальному). Род коммутируемого тока определяет некоторые конструктивные особенности контакторов. Поэтому контакторы переменного и постоянного тока обычно не взаимозаменяемые. Однако имеются контакторы, совмещающие в себе возможности коммутации как постоянного, так и переменного тока.

Пускатели предназначены для включения и отключения двигателей и отличаются от контакторов в основном наличием встроенной системы, осуществляющей защиту двигателей от токов перегрузки.

Контроллер — это электрический аппарат с ручным управлением, предназначенный для изменения схемы подключения электродвигателя к системе электропитания, а также для коммутации обмоток трансформаторов.

Электрические реле управления работают в схемах автоматического управления электроприводами. Коммутируемые токи не превышают 10 А, и поэтому дугогасительные устройства в них не применяются.

Командоаппараты предназначены для переключений в цепях управления силовых электрических аппаратов (контакторов, пускателей).

Рубильники рассчитаны практически на весь диапазон номинальных токов. Отключение электрической цепи рубильником обычно производится в обесточенном состоянии или при небольших токах.

Электромагниты управления применяются в исполнительных механизмах различного промышленного назначения, а также в качестве самостоятельного функционального блока.

В зависимости от вида воздействия на исполнительный механизм электромагниты подразделяются на:

одностороннего действия — тянущие или толкающие;

одностороннего действия — тянущие и толкающие;

двустороннего действия с нулевым положением;

реверсивного действия;

для ударной нагрузки;

поворотные.

Электроуправляемые муфты предназначены для передачи потока механической энергии или крутящего момента от ведущей части муфты к ее ведомой части.

В зависимости от рода связи между ведущей и ведомой частями муфты подразделяются на три основных вида:

электромагнитные муфты с механической связью;

электромагнитные порошковые муфты;

индукционные муфты.

Электромагнитные муфты с механической связью осуществляют соединение ведущей и ведомой частей под действием фрикционных сил, возникающих при механическом нажатии ведущей и ведомой частей на промежуточный фрикционный диск. Механическое нажатие на фрикционный диск осуществляется под действием электромагнитного усилия, создаваемого параметрически управляемым полем электромагнита, органически входящего в конструкцию муфты.

В электромагнитных порошковых муфтах механическая связь происходит под действием сцепления частиц ферромагнитного порошка, заполняющего воздушный зазор между ведущей и ведомой частями муфты.

В индукционных муфтах механическая связь осуществляется за счет взаимодействия индукционных токов в ведомой части с магнитным полем в воздушном зазоре между ведущей и ведомой частями, возбуждаемым электромагнитом ведущей части.

Аппараты распределительных устройств предназначены для защиты электрооборудования в различных аварийных режимах (токи перегрузки и короткого замыкания, недопустимое снижение напряжения, токи утечки на землю при повреждении изоляции, обратные токи и т.п.). Эти аппараты подразделяются на автоматические выключатели и низковольтные предохранители.

Автоматические выключатели (автоматы) включаются и отключаются относительно редко. Автоматы на разные номинальные токи способны

отключать большие токи короткого замыкания (до 150 кА). При этом отключение происходит с выраженным токоограничивающим эффектом. Автоматы имеют обычно сложные контактно-дугогасительные устройства.

Основные виды автоматов: универсальные, установочные, быстродействующие, гашеиия магнитного поля, защиты от утечек на землю.

Быстродействующие автоматы постоянного тока устанавливаются обычно в преобразовательных установках. Время их срабатывания измеряется несколькими сотыми долями секунды.

Автоматы гашения магнитного поля предназначены для гашения поля возбуждения крупных синхронных машин при возникновении в них внутреннего короткого замыкания.

Автоматы защиты от токов утечки на землю служат для защиты людей и животных от поражения электрическим током, а также от токов короткого замыкания и перегрузок в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Преимущественное распространение получили универсальные и установочные автоматы. Вторые отличаются от первых лишь наличием изоляционного кожуха, благодаря чему они могут устанавливаться в общедоступных помещениях. Универсальные автоматы постоянного и переменного тока работают главным образом в распределительных устройствах иизкого напряжения.

Низковольтные предохранители служат для защиты электрооборудования от больших токов перегрузки и короткого замыкания. Различают предохранители с открытой плавкой вставкой, закрытые (плавкая вставка размещена в патроне) и предохранители с наполнителем (кварцевый песок, мел).

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ АВТОМАТИКИ

Технические средства автоматики, с помощью которых выполияются различные операции с сигналами (получение и сбор, считывание, формирование, обработка, преобразование, адресование, сравнение, хранение, размножеиие, изменение уровня, логические операции и т. п.), относят к электрическим аппаратам автоматики, если хотя бы один из сигналов (на входе или выходе аппарата) электрический [31.4]. Под сигналом подразумевается воспринимаемая или передаваемая информация о вещественном (размер, плотность, цвет и т.п.) или энергетическом (скорость, давление, температура, напряжение, ток, cos φ, КПД и т.д.) параметре. Сигналы могут быть периодическими и иепериодическими, непрерывными и дискретными.

Для реализации электрических аппаратов автоматики используются разнообразные физические принципы. По назиачению они классифицируются следующим образом:

первичные преобразователи (датчики) — преобразующие контролируемую (входную, как правило, иеэлектрическую) величину в выходной электрический сигнал. Часто конструктивно датчики включают в себя усилители и релейные элементы (например, триггер Шмитта). Датчики с релейным выходом называются биполярными;

распределители (коммутаторы) — распределяющие информацию в виде электрических сигналов по различным каналам связи;

сумматоры, логические элементы, регулирующие органы — обрабатывающие информацию, поступающую по различным каналам (входам) в виде электрических сигналов, и вырабатывающие команду (сигнал) для исполнительных устройств;

исполнительные аппараты. К этому классу аппаратов относятся электрические реле автоматики, электрогидровентили, электрогидрокраны, электроклапаны, магнитные опоры и подвесы, задвижки, толкатели и др.;

электрические реле автоматики — устройства для защиты электрических систем, сетей и цепей, а также других объектов от несанкционированных режимов работы; для выработки сигналов, оповещающих о приближении нештатных ситуаций и об их наступлении; для усиления, размножения, обработки, кодирования и запоминания поступающей информации.

К разновидностям электрических реле относятся герконовые реле, основу которых составляют герметизнрованные магнитоуправляемые контакты (герконы).

К электрическим аппаратам автоматики можно отнести также релейные аппараты с механическим управлением (входом) и электрическим выходом: кнопки, ключи, клавиатуры, тумблеры, микровыключатели.

31.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

К основным явлениям, сопровождающим работу электрического аппарата, относятся: процессы коммутации электрических цепей (или механических нагрузок), электромагнитные процессы (электромеханические и индукционные явлеиия, электромагнитные взаимодействия элементов аппарата и т.п.) и тепловые процессы.

Общим фактором для всех аппаратов, оказывающим непосредственное влияние на указанные процессы, является режим работы аппарата. Таких режимов три: длительный (при длительном прохождения тока аппарат нагревается до установившейся температуры), кратковременииый (в отключенном состоянии между отдельными включениями температура нагрева аппарата снижается практически до температуры окружающей среды), повторно-кратковременный (температура нагрева за время паузы тока ие успевает сиизиться до температуры окружающей среды). Два последних режима характеризуются относительиой продолжительностью включения, %

$$\text{ПВ} = \left[t_{\text{н}}/(t_{\text{н}} + t_{\text{п}})\right] 100, \qquad (31.1)$$

где $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{н}}$ время паузы и нагрузки тока. Стандартиые зиачеиия ПВ: 15; 25; 40; 60%.

Функции коммутации электрических цепей осуществляют выключатели высокого напряжения, контакторы, пускатели, реле, предохранители, ру-

бильники и разъединители, автоматические выключатели и другие коммутаторы электрических цепей.

Коммутацию механических нагрузок реализуют аппараты, основным элементом которых являются электромагнитные устройства — тяговые электромагниты различного назначения, электромагнитные заслонки, муфты и т.п.

Коммутация электрической цепи аппаратами осуществляется путем изменения электрического сопротивления их коммутирующего органа. Для коммутирующего органа электрического аппарата характерны два режима: коммутационный и усилительный. В коммутационном режиме происходит скачкообразное изменение сопротивления $R_к$ коммутирующего органа и быстрое изменение тока нагрузки. В усилительном режиме происходит плавное изменение сопротивлений $R_к$ и тока нагрузки. Сопротивление коммутирующего органа во включенном состоянии $R_{к.вкл}$ мало, его сопротивление в отключенном состоянии $R_{к.откл}$ велико. Отношение этих сопротивлений определяет глубину коммутации

$$K_к = R_{к.откл}/R_{к.вкл}. \qquad (31.2)$$

Для электромеханических аппаратов (с контактной системой) $K_к = 10^{10} \div 10^{14}$, для коммутирующего органа на статических (бесконтактных) аппаратах $K_к = 10^4 \div 10^7$. При скачкообразном изменении сопротивления коммутирующего органа не может произойти мгновенной коммутации электрической цепи, что объясняется основным законом коммутации: при ее реализации ток в индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться скачком. Процесс коммутации в контактных аппаратах длится доли секунды, а в бесконтактных полупроводниковых — микросекунды.

Основным элементом коммутирующего органа контактных аппаратов являются контакты различного исполнения. Нормальное функционирование контактов обусловлено правильным выбором их материала, контактного нажатия и формы поверхностей контактирования. Указанные факторы должны предотвращать недопустимый нагрев контактов, их сваривание и отталкивание (при больших токах), обеспечивать достаточный срок службы по электрической и механической износостойкости. Помимо перечисленных факторов большое значение для обеспечения требуемой работоспособности контактной системы (особенно в стадии размыкания) имеют дугогасительные и искрогасительные устройства.

Замкнутое состояние контактов характеризуется переходным контактным сопротивлением

$$R_{пер} = R_с + R_п, \qquad (31.3)$$

где $R_с$ — сопротивление суженных участков, по которым проходит ток, и площадкам смятия в местах контактирования; $R_п$ — сопротивление загрязняющих пленок (оксиды, грязепылевые осадки и т.п.) на поверхности контактов и узких металлических перешейков, возникающих вследствие фриттинга.

Для слаботочных контактов (до 10 А), когда контактные нажатия невелики (до 1 Н), $R_п$ имеет существенное значение и определяется по формуле

$$R_п = R_п^0 d/S, \qquad (31.4)$$

где $R_п^0$ — удельное поверхностное сопротивление пленок; S — площадь поверхности соприкосновения по пленкам, d — толщина пленки.

Для разных материалов контактов и условий эксплуатации $R_п^0 = (2 \div 25)\, 10^{-9}$ Ом·см^2.

Сопротивление сужения (или сопротивление стягивания многоточечного контакта)

$$R_с = \frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{\pi\, \sigma_{см}}{n\, P_к}}, \qquad (31.5)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала контактов; $\sigma_{см}$ — сопротивление материала смятию; $P_к$ — контактное нажатие; n — число точек контактирования.

В предельном случае при наихудшем контактировании: $n = 1$ для точечного контакта, $n = 2$ для линейного контакта, $n = 3$ для плоскостного контакта. Значение контактного нажатия должно быть таким, чтобы при прохождении номинального тока область контактирования нагревалась до температуры не выше 105 °С для медных контактов и не выше 180 °С для контактных материалов на основе серебра.

Для сильноточных контактов (несколько десятков ампер и выше), когда контактные нажатия велики, сопротивлением $R_п$ можно пренебречь и определять переходное контактное сопротивление по формуле (31.5). Существуют более точные эмпирические зависимости $R_{пер}$, $R_с$ и $R_п$ [31.1].

При отключении электрической цепи с током нагрузки до 10 А и напряжении до 220 В на контактах появляется искра или небольшая электрическая дуга, которые быстро гасятся за счет раствора контактов. При токах в десятки, сотни ампер и более для гашения электрической дуги применяются разнообразные дугогасительные устройства, в которых электрическая дуга растягивается и интенсивно охлаждается (щелевые дугогасительные камеры, камеры с деионной решеткой, камеры с магнитным дутьем, трансформаторное масло в сочетании с лабиринтной камерой — в высоковольтных выключателях и т.п.).

Общее условие гашения электрической дуги или искры: электрическая прочность межконтактного промежутка должна быть выше восстанавливающегося на контактах напряжения сети.

Состояние межконтактного промежутка в процессе дугогашения описывается уравнением:

$$dQ/dt = Ei_д - P_0, \qquad (31.6)$$

где Q — количество теплоты, содержащейся в единице длины дуги; E и $i_д$ — градиент напряжения и ток дуги; P_0 — мощность, отводимая от единицы длины дуги; t — время.

Обычно (с большой достоверностью) принимается, что сопротивление $R_д^0$ единицы длины дуги

является функцией ее теплосодержания Q, зависящей от подводимой $P_{под}$ и отводимой $P_{отв}$ мощностей. Тогда после дифференцирования и преобразований уравнение (31.6) приводится к общему уравнению вольт-амперной динамической характеристики дуги:

$$\frac{1}{i_д}\frac{di_д}{dt} - \frac{1}{E}\frac{dE}{dt} = \frac{d[F(Q)]/dt}{F(Q)}(Ei_д - P_{отв}), \quad (31.7)$$

где

$$dF(Q) = F[\int(P_{под} - P_{отв})dt]. \quad (31.8)$$

Уравнения (31.6) — (31.8) в совокупности с эмпирическими зависимостями изменения электрической прочности межконтактного промежутка в процессе дугогашения позволяют принципиально определить условия успешной коммутации электрической цепи с дугогашением [31.2].

В основе принципа действия статических аппаратов, выполненных на силовых полупроводниковых приборах, лежит явление изменения их проводимости под воздействием управляющих сигналов. Физическая сущность этого явления заключается в изменении концентрации носителей электрических зарядов в полупроводниковой структуре прибора. Во многих видах полупроводниковых приборов изменение концентрации носителей происходит на границе полупроводниковых слоев с разным типом проводимости — электронной (n-типа) и дырочной (p-типа). Тип проводимости формируется на этапах изготовления прибора путем внесения примесей соответствующих элементов. Граница слоев с разным типом проводимости образует p–n-переход, в области которого формируется пространственный заряд. Значение этого заряда связано с концентрацией носителей на границе p–n-перехода и влияет на проводимость прибора. Под воздействием напряжения внешних цепей, включающих цепь управления, пространственный заряд и соответственно проводимость прибора могут изменяться. Приборы, основанные на изменении проводимости p–n-перехода, принято называть биполярными.

Другим перспективным видом полупроводниковых приборов являются униполярные, или полевые, приборы. Проводимость этих приборов изменяется за счет изменения концентрации носителей в определенных зонах структуры прибора под воздействием электрического поля, создаваемого сигналом управления. Этот вид приборов отличается малым потреблением мощности на управление.

В современных электронных аппаратах силовые полупроводниковые приборы работают в импульсном, или ключевом, режиме. При этом проводимость прибора скачкообразно изменяется от минимального до максимального значения в соответствии с типом прибора. В результате происходит процесс коммутации цепи, особенностью которого является наличие остаточного тока в выключенном состоянии и остаточного напряжения на включенном приборе.

Основным отличием процесса коммутации в электронных аппаратах от аналогичного процесса в электромеханических аппаратах является отсутствие эффекта дугообразоваиия. В результате энергия, выделяемая в процессе коммутации, переходит непосредственно в тепловую энергию внутри прибора или специального энергопоглотителя. Функцию последних, как правило, вьшолняют пассивные RCL-цепи или мощные стабилитроны. Существуют также электронные аппараты с рекуперацией коммутационной энергии в сеть.

Принцип действия статических аппаратов с управляемыми магнитными усилителями и ключами основан также на изменении их проводимости под воздействием напряжения внешней электрической цепи и (или) сигнала управления. Для функционирования статических аппаратов с магнитными управляемыми элементами необходимо наличие источника переменного тока. Изменение проводимости магнитного усилителя или ключа для цепи переменного тока является следствием изменения динамической индуктивиости. Последняя определяется рабочим значением индукции магнитопровода, которая нелинейно зависит от напряженности магнитного поля и может изменяться под воздействием источников напряжеиия внешних цепей, включающих цепи управления.

Тепловые явления обусловлены наличием в аппаратах источников теплоты: токоведущих частей, контактных переходов, электрической дуги. При повышенной частоте источника питания (400 Гц и выше) проявляются поверхностный эффект и эффект близости, что приводит к повышенному нагреву проводников или других токоведущих элементов.

В электрических аппаратах имеются все три вида теплопереноса: теплопроводность, коивекция и излучение.

Для приближенного расчета теплового режима электрических аппаратов используется формула Ньютона, в которой коэффициентом теплоотдачи $K_т$ объединяются все три вида теплопереноса. По этой формуле мощность P, отводимая от нагретой до температуры T поверхности охлаждения $S_{охл}$, равна:

$$P = K_т S_{охл}(T - T_{окр}), \quad (31.9)$$

где $T_{окр}$ — температура окружающей среды.

В соответствии с теорией теплового подобия проводников элементарной формы

$$K_т = 1{,}33\left(\frac{T - T_{окр}}{l^{0,25}}\right)^{0,25} + 2{,}04\cdot 10^{-7} T_{окр}\,\varepsilon\left(\frac{2{,}03T}{T_{окр}} - 1\right), \quad (31.10)$$

где l — длина проводника в направлении интенсивного отвода теплоты (для горизонтальных проводников круглого сечения — диаметр проводника, для горизонтальных шии прямоугольного сечения — высота шины); ε — коэффициент теплового излучения (для разиых токоведущих материалов $\varepsilon = 0{,}04 \div 0{,}85$).

В большинстве электрических аппаратов (кроме силовых электронных, реакторов, трансформаторов и некоторых других) имеется привод, предназначенный для выполнения необходимых механических операций и их циклов, обеспечивающих работоспособность аппарата в условиях эксплуата-

ции. В электрических аппаратах используются разные электромагнитные, электродвигательные, пружинные, пневматические, гидравлические, пневмогидравлические и приводы других видов.

В ручных приводах используется мускульная энергия оператора.

В электромагнитных и электродвигательных приводах источником энергии является непосредственно электрическая сеть.

В пружинных, пневматических и гидравлических приводах используется энергия, предварительно запасенная собственно в пружинах, пневматических и пневмогидравлических аккумуляторах.

Работа каждого элемента привода взаимосвязана с работой других устройств, а время срабатывания отдельных элементов в совокупности определяет время отключения или включения аппарата. Во многих конструкциях электрических аппаратов пружинный приводной механизм часто применяется вместе с ручным, электромагнитным, пневматическим или гидропневматическим приводным устройством, которое, совершая операцию отключения или включения, взводит аккумулирующие пружины и, следовательно, подготавливает аппарат для операции включения или отключения (автоматы, выключатели высокого напряжения, контакторы, разъединители и др.).

Связь электрических и магнитных величин в электрических аппаратах определяется первым и вторым уравнениями Максвелла. Из первого уравнения Максвелла следует закон полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathrm{I}_{\mathrm{п}}, \qquad (31.11)$$

где $\mathbf{H}$ — вектор напряженности магнитного поля; $\mathrm{I}_{\mathrm{п}}$ — вектор полного тока, пронизывающего контур l.

Зависимость между напряженностью магнитного поля, магнитной индукцией B и намагниченностью M:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}). \qquad (31.12)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Векторы магнитной индукции и магнитного потока выражаются через векторный магнитный потенциал

$$\mathbf{B} = \mathrm{rot}\ \mathbf{A}; \qquad (31.13)$$

$$\Phi = \int \mathbf{B}\, d\mathbf{S} = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}. \qquad (31.14)$$

В воздушных областях пространства без токов

$$B = \mu_0 H = -\mu_0 \operatorname{grad} \varphi_{\mathrm{м}}, \qquad (31.15)$$

где $\varphi_{\mathrm{м}}$ — скалярный магнитный потенциал.

При расчете магнитных систем (МС) электрических аппаратов часто используют не законы электромагнитного поля, а вытекающие из них уравнения магнитной цепи (МЦ), в частности, первый и второй законы Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^{n} \Phi_k = 0; \qquad (31.16)$$

$$\sum_{i=1}^{n} H_i l_i = \sum_{i=1}^{n} U_{\mathrm{м}i} = F, \qquad (31.17)$$

где Φ_k — магнитный поток в k-й ветви МЦ; H_i и l_i — напряженность магнитного поля и длина i-го участка МЦ; $U_{\mathrm{м}i}$ — магнитное напряжение на i-м участке МЦ; F — магнитодвижущая сила (МДС).

В расчетах МЦ используются понятия магнитной проводимости Λ и магнитного сопротивления

$$R_{\mathrm{м}} = 1/\Lambda. \qquad (31.18)$$

При этом по закону Ома для МЦ

$$U_{\mathrm{м}} = \Phi/\Lambda = \Phi R_{\mathrm{м}}. \qquad (31.19)$$

При расчете МС переменного тока используется метод эквивалентных синусоид, а величины, входящие в формулу закона Ома, представляются в комплексном виде:

$$\dot{U}_{\mathrm{м}} = \frac{\dot{\Phi}_{\mathrm{м}m}}{\sqrt{2}} \underline{Z}_{\mathrm{м}}. \qquad (31.20)$$

Здесь $\dot{U}_{\mathrm{м}}$ — действующее значение магнитного напряжения; $\dot{\Phi}_{\mathrm{м}m}$ — амплитудное значение магнитного потока; $\underline{Z}_{\mathrm{м}}$ — магнитное сопротивление участка МЦ.

В свою очередь

$$\underline{Z}_{\mathrm{м}} = R_{\mathrm{м}} + j X_{\mathrm{м}}, \qquad (31.21)$$

где $R_{\mathrm{м}}$ и $X_{\mathrm{м}}$ — активная и реактивная составляющие $\underline{Z}_{\mathrm{м}}$.

Для расчета электромагнитного взаимодействия между частями электрических аппаратов используются три метода: *энергетический метод; метод, основанный на использовании формулы Максвелла; метод взаимодействия токов с магнитным полем на основе использования закона Ампера.*

По первому методу для МС, не содержащих ферромагнитные тела или содержащих ферромагнитные тела, выполненные из изотропных материалов без учета гистерезиса, электромагнитная сила $P_{\mathrm{эм}}$ определяется либо по изменению магнитной энергии W при возможном перемещении на расстояние x элемента МС в условиях постоянства потокосцепления Ψ обмотки возбуждения:

$$P_{\mathrm{эм}} = -(\partial W/\partial x) \quad (\Psi = \mathrm{const}), \qquad (31.22)$$

либо по изменению магнитной коэнергии W^* при возможном перемещении на расстояние x элемента МС в условиях постоянства тока i в обмотке возбуждения:

$$P_{\mathrm{эм}} = -(\partial W^*/\partial x) \quad (i = \mathrm{const}). \qquad (31.23)$$

Для линейной МС с одной обмоткой возбуждения без учета вихревых токов

$$W = W^* = \Psi i/2. \qquad (31.24)$$

При неизменном потокосцеплении в обмотке линейной МС из (31.22) и (31.24) следует

$$P_{\mathrm{эм}} = -0{,}5\, \Psi (di/dx) \quad (\Psi = \mathrm{const})$$

$$= -0{,}5 \frac{\Psi^2}{N^2} \left[d \left(\frac{1}{\Lambda_{\Sigma\Psi}} \right) / dx \right], \qquad (31.25)$$

где $\Lambda_{\Sigma\Psi} = \Psi/FN$ — суммарная магнитная проводимость обмотки МС, приведенная к ее МДС F и числу витков N [31.3, 31.4].

При неизменном токе в обмотке линейной МС из (31.3) и (31.24)

$$P_{эм} = 0{,}5\, i\,(d\Psi/dx) = 0{,}5\, i^2(dL/dx) = \quad (i = \text{const})$$

$$= 0{,}5\, F^2(d\Lambda_{\Sigma}\Psi/dx), \qquad (31.26)$$

где L — статическая индуктивность обмотки.

По второму методу вектор электромагнитной силы $\mathbf{P}_{эм}$ представляется как сумма векторов элементарных сил натяжения $d\mathbf{P}_{эм}$, действующих извне на каждый элемент dS поверхности S, охватывающей объем V в области магнитного поля:

$$\mathbf{P}_{эм} = \oint_S d\mathbf{P}_{эм} = \oint_S \mathbf{T}_n\, dS, \qquad (31.27)$$

где

$$\mathbf{T}_n = \lim_{(\Delta S \to 0)} (\Delta \mathbf{P}_{эм}/\Delta S) \qquad (31.28)$$

— сила натяжения, действующая извне на единицу поверхности, внешняя нормаль к которой направлена по n. Можно показать [31.5], что

$$\mathbf{T}_n = \frac{1}{\mu_r \mu_0}\left(\mathbf{B} B_n - 0{,}5\, B^2 \mathbf{n}\right). \qquad (31.29)$$

В (31.29) $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции в рассматриваемой точке поверхности S; $\mu_r \mu_0 = \mu$ — магнитная проницаемость среды в этой точке; $\mathbf{n}$ — единичный нормальный вектор (нормальный орт) к той стороне поверхности, на которую действует натяжение $\mathbf{T}_n$; B_n и B — соответственно нормальная составляющая и модуль вектора $\mathbf{B}$.

Выражение (31.29) представляет собой формулу Максвелла для натяжения.

Если поверхиость S разделяет объем V, заполненный ферромагнетиком с $\mu = \infty$ и воздушной средой, то вектор B направлен по n; с учетом этого из (31.27) и (31.29)

$$\mathbf{P}_{эм} = \frac{1}{2\mu_0}\oint_S B^2\, \mathbf{n}\, dS. \qquad (31.30)$$

Если на какой-то площади $S_к$, являющейся частью поверхности S ферромагнитной детали, поле можно считать плоскопараллельным ($B_к = \text{const}$), а на остальных участках этой поверхности возможно принять $B = 0$, то при допущении для ферромагнетика $\mu = \infty$ на участок поверхности детали площадью $S_к$ действует электромагнитная сила

$$P_{эм} = \frac{1}{2\mu_0}\int_S B^2\, dS = \frac{B_к^2\, S_к}{2\mu_0} = \frac{\Phi_к^2}{2\mu_0 S_к}, \qquad (31.31)$$

где $\Phi_к = B_к S_к$.

При расчете *по третьему методу* используется закон Ампера в дифференциальной форме:

$$d\mathbf{P}_{эм} = i\,[d\mathbf{l}\mathbf{B}] = idlB\sin\gamma, \qquad (31.32)$$

где i — ток в проводнике; $d\mathbf{l}$ — элементарный участок проводиика; $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, создаваемая на участке $d\mathbf{l}$ другими источниками поля; γ — угол между векторами $d\mathbf{l}$ и $\mathbf{B}$.

Магнитиая индукция $\mathbf{B}$ находится по закону Био–Савара–Лапласа:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3}(d\mathbf{l}\mathbf{r}), \qquad (31.33)$$

где $d\mathbf{B}$ — элементарный вектор магнитной индукции в точке p, создаваемый током i в элементе проводника $d\mathbf{l}$; $\mathbf{r}$ — радиус-вектор от $d\mathbf{l}$ к p.

При работе большинства электрических аппаратов в них и окружающем пространстве индуктируется напряженность электрического поля, определяемая вторым уравнением Максвелла, из которого следует закон электромагнитной индукции

$$e_{инд} = \oint \mathbf{E}_{инд}\, dl = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_S \mathbf{B} dS, \qquad (31.34)$$

где $e_{инд}$ и $E_{инд}$ — индуктируемые сторонние ЭДС и напряженность электрического поля в контуре l, ограничивающем поверхность S, сквозь которую проходит магнитный поток Φ.

В общем случае поток Φ является как функцией времени, так и функцией перемещения контура относительно системы координат. Тогда индуктируемую ЭДС можно представить в виде двух составляющих:

$$e_{инд} = \oint \mathbf{E}_{инд}\, dl = -\frac{d\Phi}{dt} = e_{тр} + e_{дв}. \qquad (31.35)$$

Здесь составляющая

$$e_{тр} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_S \mathbf{B}\, dS = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\, dS \qquad (31.36)$$

определяется только изменением вектора $\mathbf{B}$ во времени без изменения во времени границ интегрирования dS и называется *трансформаторной ЭДС*, а составляющая

$$e_{дв} = \oint [\mathbf{v}\,\mathbf{B}]\, d\mathbf{l} \qquad (31.37)$$

обусловлена только движением контура l со скоростью $\mathbf{v}$ во внешнем магнитном поле $\mathbf{B}$ и называется *ЭДС движения* или *генераторной ЭДС*.

После применения теоремы Остроградского–Стокса к (31.35) с учетом (31.36) и (31.37) имеем

$$e_{инд} = \int_S \text{rot}\, \mathbf{E}_{инд}\, dS = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\, dS + \int_S \text{rot}\,[\mathbf{v}\mathbf{B}]\, dS. \qquad (31.38)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

31.1. **Основы теории электрических аппаратов** /Под ред. И. С. Таева. М.: Высшая школа, 1987.

31.2. **Таев И. С.** Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1973.

31.3. **Электромеханические аппараты автоматики**: Учеб. для вузов /Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. М.: Высшая школа, 1988.

31.4. **Коробков Ю. С., Флора В. Д.** Электромехаиические операторы автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1991.

31.5. **Иванов-Смоленский А. В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989.

Раздел 32

КОММУТАЦИОННАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

32.1. Общие сведения 301
32.2. Нормирование параметров восстанавливающегося напряжения 302
32.3. Выключатели переменного тока 303
32.4. Разъединители 307
32.5. Предохранители 311
32.6. Разрядники и ограннчители перенапряжений 313
Разрядники (313). Ограничители перенапряжений (314). Выбор разрядников и ограничителей напряжения (315)

32.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Номинальный ток $I_{ном}$ — иаибольший ток (действующее значение), который аппарат способен длительно проводить при заданном напряжении, номинальной частоте и номинальной температуре воздуха, при этом температура частей аппарата не должна превышать допустимую, установленную для длительной работы.

2. Номинальное напряжение $U_{ном}$ — линейное напряжение трехфазной системы, в которой аппарат предназначен работать. Если выключатель может использоваться для различных классов напряжения, то за номииальное принимается наибольшее номинальное напряжение. Для компеисации падения напряжения на источниках энергии (генераторах, трансформаторах и лиииях электропередачи) напряжение аппарата принимается на 5÷15% выше относительно иоминального значения. Каждый класс напряжения имеет свое наибольшее рабочее напряжение $U_{н.р}$:

$U_{ном}$, кВ	$U_{н.р}$, кВ	$U_{ном}$, кВ	$U_{н.р}$, кВ
6	7,2	110	126
10	12	220	172
15	17,5	330	363
20	24	500	525
35	40,5	750	787

3. Номинальный ток отключения $I_{о.\,ном}$ — наибольший ток короткого замыкания (действующее значение), который выключатель способен отключить при напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению при заданных условиях восстановления напряжения и заданном цикле операций.

Ток отключения состоит из периодической и апериодической составляющих и меняется по действующему значению. Номинальный ток отключения определяется действующим значением периодической составляющей в момент расхождения контактов.

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания (КЗ) определяется в момент расхождения контактов и оценивается параметром β, равиым отношению апериодической составляющей тока к амплитуде периодической в момент расхождеиия контактов. Допустимое значение β приводится в каталогах на выключатели и выражается в процентах.

4. Под циклом операций понимают перечень коммутационных операций, который обязан совершить аппарат. Так, для выключателей, допускающих автоматическое повторное включение (АПВ), должны быть обеспечены циклы: 1) О — $t_{бт}$ — ВО —180 с — ВО; 2) О — 180 с — ВО — 180 с — ВО. Выключатели с $U_{ном} \leq 220$ кВ должны также выполнять работу в цикле О — $t_{бт}$ — ВО — 20 с — ВО. Выключатели без АПВ должны выдерживать только цикл 2.

Здесь О — операция отключения; ВО — операция включения и немедленно следующая за ней операция отключения; $t_{бт}$ — гарантируемая для выключателя минимальная бестоковая пауза при АПВ (время от погасания дуги на всех полюсах до появления тока при последующем включении). Время $t_{бт}$ для различных выключателей находится в пределах 0,3÷1,2 с, причем для выключателей, предназначенных для работы при быстродействующем АПВ (БАПВ), это время принимается равным 0,3 с. 20 с и 180 с — время в секундах между операциями ВО.

5. Термическая и электродинамическая стойкость аппарата при сквозных токах короткого замыкания характеризуется токами $I_т$ при заданном времени $t_т$ и $I_{дин}$. Ток сквозной стойкости — это ток, который пропускает через себя токоведущий контур аппарата при полностью включенном положении, когда нажатие контактов номинальное.

Ток термической стойкости связан с номинальным током отключения неравенством

$$I_т \geq I_{о.\,ном}$$

(время $t_т = 1 \div 3$ с при $U_{ном} \leq 220$ кВ и $t_т = 1 \div 2$ с при $U_{ном} \geq 330$ кВ).

При протекании тока $I_т$ в течение времени $t_т$ температура токоведущих частей не должна превышать допустимую для кратковременного режима работы.

Ток электродинамической стойкости определяется амплитудным зиачением ударного тока. Этот ток связан с током отключения неравенством

$$i_у \geq 1{,}8\sqrt{2}\, I_{о.\,ном} = 2{,}55 I_{о.\,ном}.$$

Иногда электродинамическая стойкость определяется действующим значением ударного тока в течение первого периода после начала КЗ:

$$I_{дин} \geq I_{о.ном}.$$

6. Номинальный ток включения — ток короткого замыкания, который выключатель с соответствующим ему приводом способен включить без приваривания контактов и других повреждений при напряжении сети $U_{н.р}$ и заданном цикле операций. Ток включения определяется как его амплитудой ($I_{m\,вкл} = 1{,}8\sqrt{2}\,I_{о.ном}$), так и начальным действующим значением периодической составляющей ($I_{вкл} \geq I_{о.ном}$).

7. Возвращающееся напряжение — действующее значение напряжения промышленной частоты, появляющееся между токоподводящими проводами разных полюсов после погасания дуги на всех полюсах (возвращающееся межполюсное напряжение) и на зажимах одного полюса после гашения дуги на нем (возвращающееся напряжение на полюсе).

8. Восстанавливающееся напряжение на контактах полюса — напряжение, появляющееся на первом гасящем полюсе после прохода тока через нуль. Оно состоит из напряжения промышленной частоты и напряжения свободных составляющих (собственных частот).

9. Коэффициент превышения амплитуды K_a восстанавливающегося напряжения для одночастотного процесса — отношение наибольшего восстанавливающегося напряжения к амплитуде возвращающегося напряжения на полюсе. Коэффициент K_a в реальных установках колеблется в пределах 1,3÷1,5.

10. Длительность дуги выключателя — промежуток времени от момента возникновения дуги на полюсе, размыкающемся первым, до момента окончательного погасания дуги на всех полюсах. Для выключателей с шунтирующими резисторами различают длительность основной дуги, в которой ток не ограничен шунтирующим резистором, и вспомогательной дуги, в которой ток ограничен шунтирующим резистором.

11. Собственное время отключения выключателя с приводом — промежуток времени с момента подачи команды на отключение до момента начала расхождения дугогасительных контактов. Для выключателей с шунтирующими резисторами следует различать время до момента расхождения главных контактов и вспомогательных.

12. Время отключения выключателя с приводом — промежуток времени от момента подачи команды на отключение до момента погасания дуги на всех полюсах (для выключателей с шунтирующими резисторами следует различать время до момента погасания основной и вспомогательной дуг).

13. Время включения (до возникновения тока в цепи) выключателя с приводом — промежуток времени от момента подачи команды на включение до момента пробоя промежутка между сближающимися контактами при номинальном напряжении в сети. Для выключателя с шунтирующим резистором следует различать время до момента пробоя между сближающимися вспомогательными контактами и основными.

14. Бестоковая пауза выключателя при автоматическом повторном включении — промежуток времени от момента погасания дуги во всех полюсах выключателя до момента возобновления тока в каком-либо полюсе выключателя.

В процессе работы выключатель подвергается длительному воздействию номинального напряжения и кратковременному воздействию повышенных значений напряжения промышленной частоты и импульсного характера. Эти напряжения приведены в ГОСТ 1516.1-76.

Принцип действия, расчет и проектирование высоковольтных выключателей рассмотрены в [32.2, 32.3]. Выключатели удовлетворяют требованиям ГОСТ 687-78 [32.1].

32.2. НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В соответствии с ГОСТ 687-78 [32.1] в месте установки выключателя кривая переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) не должна пересекаться с нормированными кривыми ПВН.

В зависимости от номинального напряжения нормированные кривые ПВН могут определяться двумя или четырьмя параметрами :

1. ПВН, определяемое двумя параметрами, представлено на рис. 32.1. Кривая восстанавливающегося напряжения не должна выйти за пределы огибающих OB и BC, но должна один раз пересечь линию запаздывания.

На сборных шинах всегда есть сосредоточенная емкость, которая облегчает процесс ПВН в самом начале. Этот факт учитывается линией запаздывания, которая идет параллельно наклонной OB и характеризуется амплитудой U' и временем t_1. Кривая ПВН идет от точки O, один раз пересекает линию запаздывания, а затем может касаться огибающей OBC.

ПВН, определяемое двумя параметрами, используется при номинальном напряжении выключателя $U_{ном} \leq 35$ кВ.

На рис. 32.1 амплитудное значение восстанавливающегося напряжения на полюсе

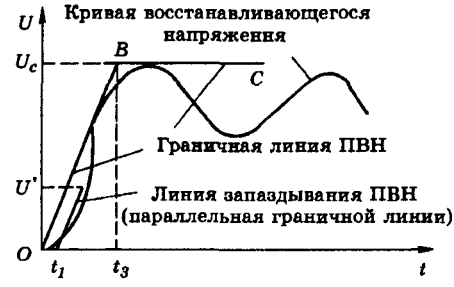


Рис. 32.1. ПВН, определяемое двумя параметрами

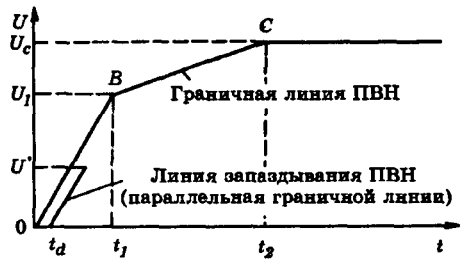


Рис. 32.2. ПВН, определяемое четырьмя параметрами

$$U_c = K_a K_{п.г} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{н.р},$$

где $K_{п.г} = 1{,}5$ — коэффициент гасящего полюса; K_a — коэффициент амплитуды, равный 1,4 для тока отключения $I_o = 100\% I_{o.ном}$ и 1,5 для $I_o = 60$ и 30% $I_{o.ном}$; $U_{н.р}$ — наибольшее рабочее напряжение, кВ; t_3 — время иаступления напряжения U_c, оно зависит от тока отключения; при $I_o = 100\%$ $I_{o.ном}$ принимают $t_{3.100} = 30$; 50; 60; 75 и 100 мкс соответствеино для $U_{ном} = 6$; 10; 15; 20 и 35 кВ; при $I_o = 60\%$ $I_{o.ном}$ принимают $t_{3.60} = \frac{3}{7} t_{3.100}$; при $I_o = 30\%$ $I_{o.ном}$ принимают $t_{3.30} = \frac{3}{14} t_{3.100}$; $U' = U_c/3$ — напряжение на конце линии запаздывания; $t_1 = 0{,}15 t_3$ — время запаздывания.

2. Для выключателей с $U_{ном} \geq 110$ кВ нормированная характеристика ПВН определяется четырьмя параметрами (рис. 32.2):

$$U_1 = K_{п.г} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{н.р} = 1{,}3 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{н.р}; \quad U_c = K_a U_1,$$

где K_a имеет те же значения, что и для $U_{ном} \leq 35$ кВ; t_1 зависит от тока отключения (при $I_o = 100\%$ $I_{o.ном}$ принимают равиым $t_{1.100}$ согласио данным табл. 32.1; $t_{1.60} = 0{,}5 t_{1.100}$ и $t_{1.30} = 0{,}2 t_{1.100}$ соответственно для $I_o = 60$ и 30% $I_{o.ном}$; $U' = 0{,}5 U_1$; $t_d = 2$; 4 и 8 мкс соответственно для $I_o = 100$, 60 и 30% $I_{o.ном}$.

Для выключателей, присоединяемых к воздушным линиям на номинальное напряжение 110 кВ и выше и с $I_{o.ном} > 12{,}5$ кА, условия отключения неудалеиных КЗ определяется параметрами линии (однофазное КЗ на землю, волиовое сопротивление линии 450 Ом, коэффнциент пика 1,6).

Скорость восстанавливающегося напряжения на первом подъеме определяется уравнением

$$\frac{du}{dt} = \frac{U_1}{t_1}.$$

Данные по параметрам схем восстаиавливающегося напряжения приведены в [32.4].

Таблица 32.1. Время $t_{1.100}$, мкс

Номинальный ток отключения, кА	$U_{ном}$, кВ					
	110	150	220	330	500	750
31,5	112	152	223	320	348	492
40	96	130	191	257	310	417
50	89	122	168	214	265	334
63	79	107	149	192	232	310

32.3. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Устройство, прииции действия, проектирование выключателей рассмотрены в [32.5, 32.7], техиические данные приведеиы в табл. 32.2÷32.6. Внешиий вид выключателей дан в [32.13] и на рис. 32.3÷32.7.

Выбор выключателя:

1. Номиальное иапряжение выключателя $U_{ном.в} \geq U_{ном.у}$ установки.

2. Номинальный ток выключателя $I_{ном.в} \geq I_{ном.у}$ установки с учетом возможного увеличения тока в ближайшие годы.

3. $I_{o.ном} \geq I_к$. Расчет $I_к$ проводится для наиболее тяжелого случая при трехфазном и однофазном КЗ на землю. Выбор производится по наибольшему значению тока КЗ. Упрощенная методика расчета дана в [32.4].

4. Апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов (МРК) $i_{а.м.р.к}$ должна быть равна или меньше допустимого значения апериодической составляющей по данным, гарантируемым заводом-изготовителем

$$i_{а.м.р.к} \leq i_{а.заводск} = \sqrt{2} \frac{\beta_{ном}\%}{100} I_{o.ном}.$$

Если $i_{а.м.р.к} > \sqrt{2} \frac{\beta\%}{100} I_{o.ном}$, то применение выключателя допустимо при условии:

$$I_{к.м.р.к} \sqrt{2} + i_{а.м.р.к} \leq \sqrt{2} I_{o.ном} \left(1 + \frac{\beta\%}{100}\right).$$

5. Амплитудное значение ударного тока при включении на КЗ $i_{уд.к}$ должно быть равно или меньше наибольшего пика тока включения выключателя $i_{вкл.наиб}$:

$$i_{уд.к} \leq i_{вкл.наиб}$$

или

$$I_{уд.к} \leq I_{вкл.нач},$$

где $I_{уд.к}$ — начальное действующее значение тока КЗ; $I_{вкл.нач}$ — иачальиое действующее значение с учетом апериодической составляющей тока включения.

6. Ток термической стойкости выключателя $I_т$ (действующее значение) в течение времени термической стойкости $t_т$ должен удовлетворять неравенству:

$$I_т^2 t_т \geq I_к^2 t_к,$$

Таблица 32.2. Технические данные маломасляных выключателей переменного тока

Тип выключателя	Предельный сквозной ток, кА		Ток термической стойкости, кА, для времени 3 и 4 с	Собственное время включения с приводом, с	Время включения, с	Собственное время отключения с приводом, с	Минимальная бестоковая пауза при АПВ, с	Масса, кг	
	действующий	амплитудный						выключателя с маслом	масла
ВМ-10-400/630-10*	10	25	10 (3 с)	0,2	0,105	0,085	0,5	105	3,5
ВМПЭ-10-630/1000/1600-20*	20	52	20 (4 с)	0,3	0,095	0,7	0,5	225,5	5,5
ВМПЭ-10-630/1000/1600-31,5*	31,5	80	31,5 (4 с)	0,3	0,12	0,09	0,5	408	8
ВМПЭ-10-3150-31,5*	31,5	80	31,5 (4 с)	0,3	0,12	0,09	0,5	408	8
ВКМ-10-630/1000/1600-20*	70	52	20 (4 с)	0,075	0,07	0,05	0,5	174, 204	12
ВК-10-630/1000/1600-31,5*	31,5	80	31,5 (4 с)	0,3	0,095	0,07	0,3	192, 220	
ВК-10-20/630/1000/1600**	20	52	20 (3 с)	0,3	0,095	0,07	0,3	192, 220	12
ВКЭ-10-31,5/630/1000/1600**	31,5	80	31,5 (3 с)	0,3	0,11, 0,14	0,09, 0,12	0,5	134,5, 144,5	4,5
ВПМ-10-20/630/1000**	20	52	20 (4 с)	0,3	0,11, 0,14	0,09, 0,12	0,5	134,5, 144,5	4,5
МГТ-10-3200/4000/5000-45*	45	120	45 (4 с)	0,4	0,15	0,12	—	1095, 1200	—
ВМТ-110Б-20/1000***	20	52	20 (3 с)	0,15	0,08	0,05	0,3	2260	260
ВМТ-220Б-20/1000***	20	52	20 (3 с)	0,15	0,08	0,05	0,3	7140	840

* В обозначении типа первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая, третья, четвертая — номинальный ток, А; последняя — номинальный ток отключения, кА.

** В обозначении типа первая цифра — номинальное напряжение, кВ; вторая цифра — номинальный ток отключения, кА; остальные — номинальный ток, А.

*** В последних образцах номинальный ток отключения увеличен до 40 кА.

Таблица 32.3. Технические данные масляных баковых выключателей переменного тока

Тип выключателя*	Предельный сквозной ток, кА		Ток термической стойкости, кА, для времени 3 и 4 с	Собственное время включения с приводом, с	Время включения, с	Собственное время отключения с приводом, с	Минимальная бестоковая пауза при АПВ, с	Масса, кг		Тип привода
	действующий	амплитудный						выключателя с маслом	масла	
С-35М-630-10	10	26	10	0,35÷0,4	0,08÷0,15	0,05÷0,12	0,5	1 040	230	ШПЭ-12, ПП-67
ВТ-35-800-12,5	12,5	31	12,5	0,34	0,09	0,06	0,5	1 050	300	ШПЭ-11
ВТД-35-800-12,5	—	—	—	—	0,15	0,12	—	1 291	—	ПП-67
МКП-35-1000-25	25	64	25	0,4	0,08	0,05	0,8	3 120	800	ШПЭ-31
С-35-3200/2000-50Б	50	127	50	0,7	0,08	0,055	0,7	5 180	1040	ШПЭ-38
У-110-2000-40	40	102	40	0,8	0,08	0,06	0,9	18 400	8000	ШПЭ-44
У-110-2000-50	50	135	50	0,3	—	0,05	0,7	15 950	5700	ШП-46

* В обозначении типа даны номинальное напряжение, кВ; номинальный ток, А; номинальный ток отключения, кА.

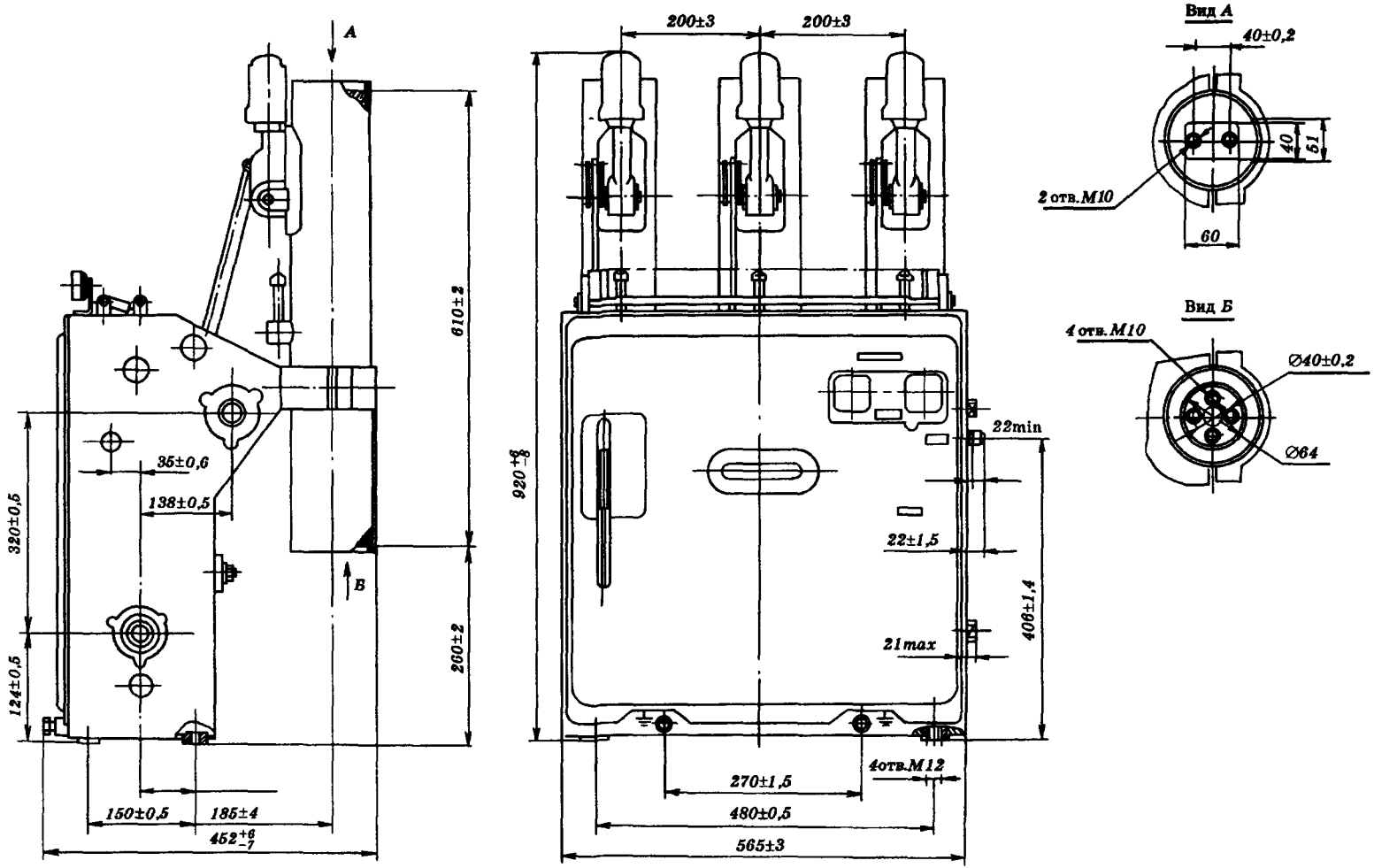


Рис. 32.3. Выключатель ВМ-10

Таблица 32.4. Технические даиные воздушных выключателей переменного тока

Тип*	Номинальный ток, А	Предельный сквозной ток, кА		Ток термической стойкости, кА, для времени 3 и 4 с	Номинальный ток отключения, кА	Время включения, с	Время отключения, с	Расход воздуха на отключение, л	Масса выключателя, кг	Число дугогасительных разрывов на полюс
		действующий	амплитудный							
ВВОА-15	12 500	140	355	145 (3 с)	140	0,1	0,08	—	9 150	2
ВВГ-20	12 500, 20 000	160	410	160 (4 с)	160	0,1	0,15	—	9 150	2
ВВУ-35	2000/3200	40	100	40 (4 с)	40	0,13	0,07	4 000	7 500	2
ВВУ-110	2000	42	102	40 (4 с)	40	0,20	0,08	8 400	15 000	—
ВВД-220	2000	31,5	80	31,5 (4 с)	31,5	0,24	0,08	9 000	16 200	4
	3200	40	102	40 (4 с)	40	—	—	14 000		
ВНВ-220	2000	40	102	40 (4 с)	40	0,1	0,04	4 200	12 000	4
ВВБ-330	2000	35	90	35,5 (4 с)	35,5	0,25	0,08	18 000	26 000	12
ВВД-330	3200	40	102	40 (4 с)	40	0,25	0,08	24 000	36 000	8
	2000	40	102	40 (4 с)	40	0,1	0,04	8 400	22 600	—
ВВБ-500	2000	35,5	90	35,5 (4 с)	35,5	0,25	0,08	27 000	63 000	12
ВНВ-500	2000	63	—	63 (3 с)	63	0,1	0,06	12 000	30 000	—
ВВБ-750	3200	40	102	40 (4 с)	40	0,11	0,06	42 000	90 000	16
ВНВ-750	3200	—	102	40 (4 с)	40	—	0,06	32 500	54 000	—
ВНВ-1150	4000	40	102	40 (4 с)	40	0,1	0,035	52 500	137 500	—
ВВБК-110	3200	50	127	50 (4 с)	50	—	0,06	—	—	2
ВВБК-220	3200	56	142	56 (4 с)	56	—	0,04	—	—	4
ВВБК-330	3200	40	102	40 (4 с)	40	—	0,04	—	—	8
ВВБК-500	2000	40	102	40 (4 с)	40	—	0,04	—	—	8
ВВБК-750	3200	40	102	40 (4 с)	40	—	0,04	—	—	8
ВВБК-1150	4000	40	102	40 (4 с)	40	—	0,04	—	—	12

* Первая цифра после буквенной части обозначения — номинальное напряжение, кВ.

Таблица 32.5. Технические данные электромагнитных выключателей

Тип выключателя	Предельный сквозной ток, кА		Ток термической стойкости, кА, для времени 3 и 4 с	Собственное время отключения выключателя с приводом, с	Время отключения выключателя с приводом, с	Собственное время включения выключателя с приводом, с	Масса, кг	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток отключения, кА
	действующий	амплитудный							
ВЭВ-6-630/16	16	41	16 (4 с)	0,06	0,08	—	245	6	16
ВЭ-6-1600/2000/3200-40	40	128	40 (4 с)	0,06	0,075	0,075	574÷606	6	40
ВЭС-6-1600/2000/3200-40	40	128	40 (4 с)	0,06	0,075	0,075	580÷610	6	40
ВЭ-10-1250/1600/2500/3600-20	20	51	20 (4 с)	0,06	0,075	0,075	522÷565	10	20
ВЭ-10-1600/2500/3150-40	40	100	40 (3 с)	0,06	0,08	0,08	650÷685	10	40

где $I_к$ — наибольший ток КЗ, действующее значение; $t_к$ — наибольшая длительность короткого замыкания.

7. Условия эксплуатации выключателя должны соответствовать требованиям каталога на выключатель.

8. Требуемая механическая и коммутационная износостойкость выключателя должны соответствовать даниым, гарантируемым каталогом.

9. Каждый выключатель согласно каталогу поставляется с соответствующим ему приводом. Требования к приводам изложены в ГОСТ 687-78.

10. Временные параметры выключателя (время включения и отключения, бестоковой паузы цикла АПВ) должны соответствовать требованиям эксплуатации.

11. Рассчитывается кривая восстанавливающегося напряжения и сравнивается с огибающей, предписаиной ГОСТ [31.1].

При формулировании заказа на выключатель следует указать наименование, тип выключателя по структуре условного обозначения, номер технических условий.

Более подробные сведения по выбору выключателей приведены в [32.12]. Там же даны каталожные данные воздушных, элегазовых и маломасляных выключателей.

Таблица 32.6. Технические данные вакуумных выключателей

Серия*	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Номинальный ток отключения, кА	Номинальный ток короткого замыкания (пик), кА	Время термической стойкости, с	Нормированное полное время отключения выключателя, с	Механический ресурс, количество циклов	Исполнение
ВВТЭ(П)-10-10У2	10	630	10	25	3	0,05	20 000	Стационарное
ВВТЭ(П)-10-20УХЛ2	10	630÷1000	20	52	3	0,05	20 000	На тележке
ВВЭ-10-20У3	10	630—1600	20	52	3	0,055	20 000	То же
ВВЭ-10-31,5У3	10	630—3150	31,5	80	3	0,055	2 000	" "
ВВЭ-10-20Т3	11	630—1250	20	52	3	0,055	20 000	" "
ВВЭ-10-31,5Т3	11	630—2500	31,5	80	3	0,055	20 000	" "
ВВВ-10-20У2	10	320	2	10	4	0,08	30 000	Стационарное

* Первая цифра после буквенной части обозначения — номинальное напряжение, кВ, вторая цифра — номинальный ток отключения, кА.

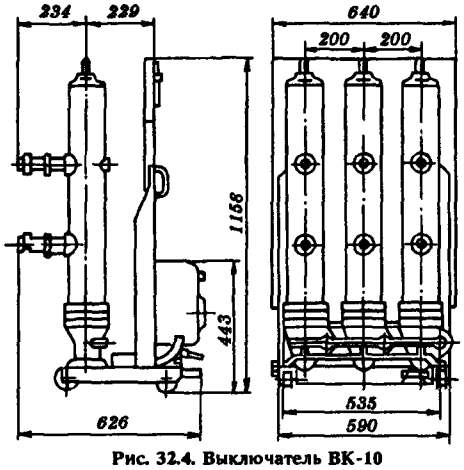


Рис. 32.4. Выключатель ВК-10

Баковые масляные электромагнитные и вакуумные выключатели подробно даны в [32.14]. Там же рассмотрены вопросы перенапряжений, возникающих при работе вакуумных выключателей.

32.4. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ

Принцип действия, устройство, проектирование разъединителей рассмотрены в [32.9, 32.13].

Технические данные разъединителей приведены в табл. 32.7 и 32.8.

Общий вид некоторых разъединителей представлен на рис. 32.8, 32.9 и в [32.13].

Условное обозначение разъединителей:

РВО — разъединитель (Р) для внутренней установки (В), однополюсный (О). Числитель — номинальное напряжение, кВ, знаменатель — номинальный ток, А.

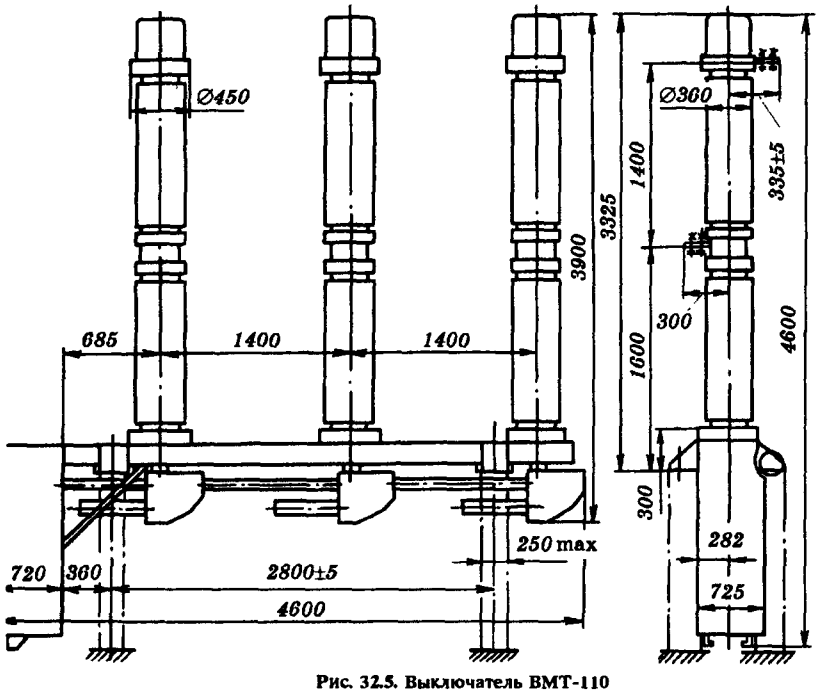


Рис. 32.5. Выключатель ВМТ-110

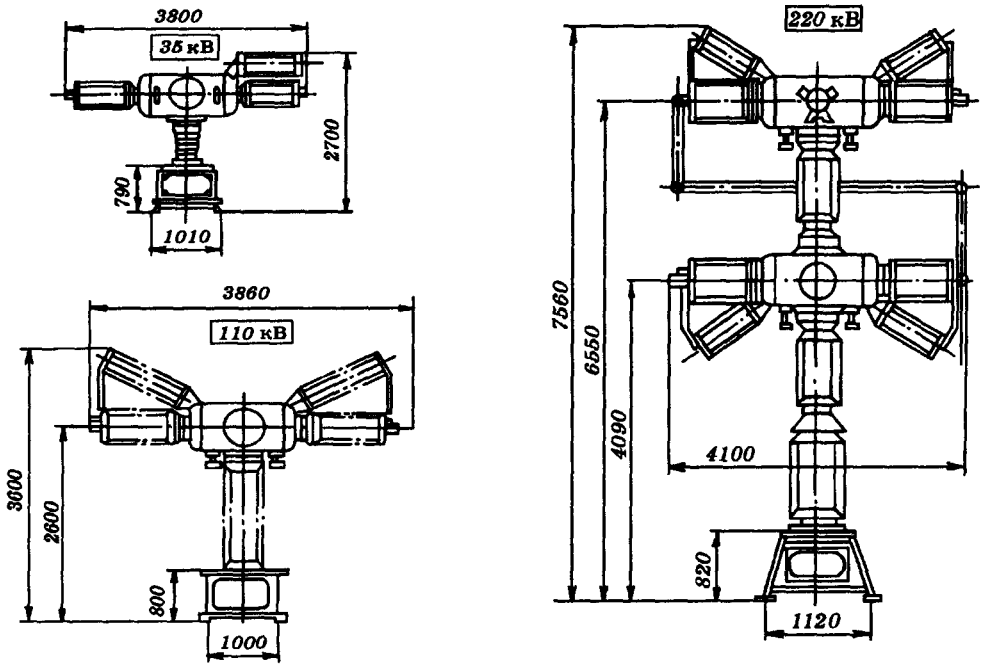


Рис. 32.6. Серия выключателей ВВБ

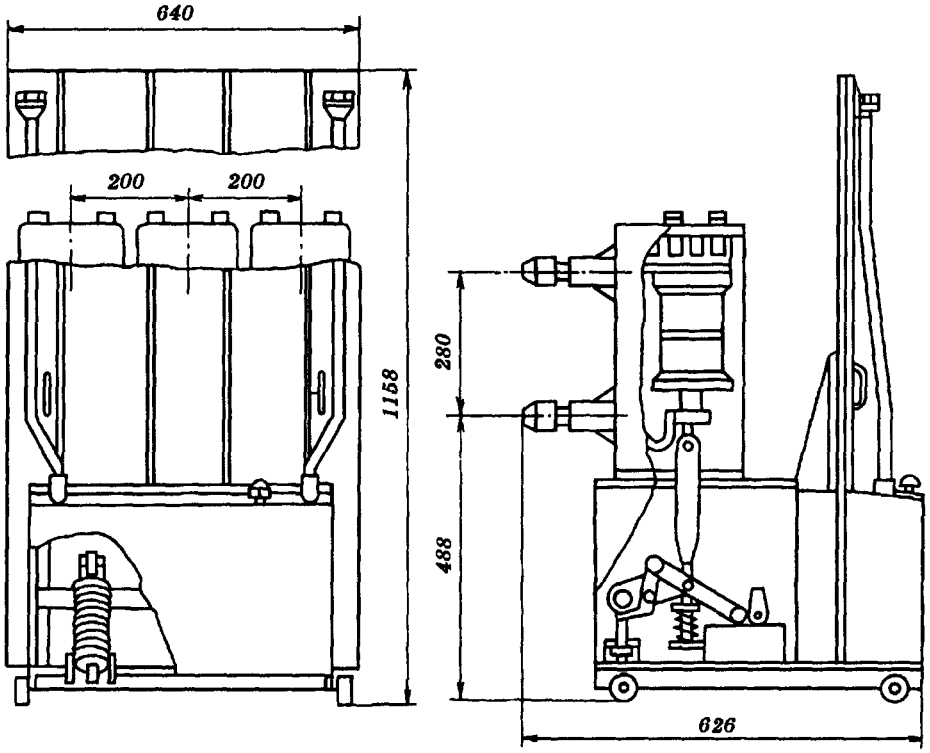


Рис. 32.7. Вакуумный выключатель ВВЭ-10-20/1600

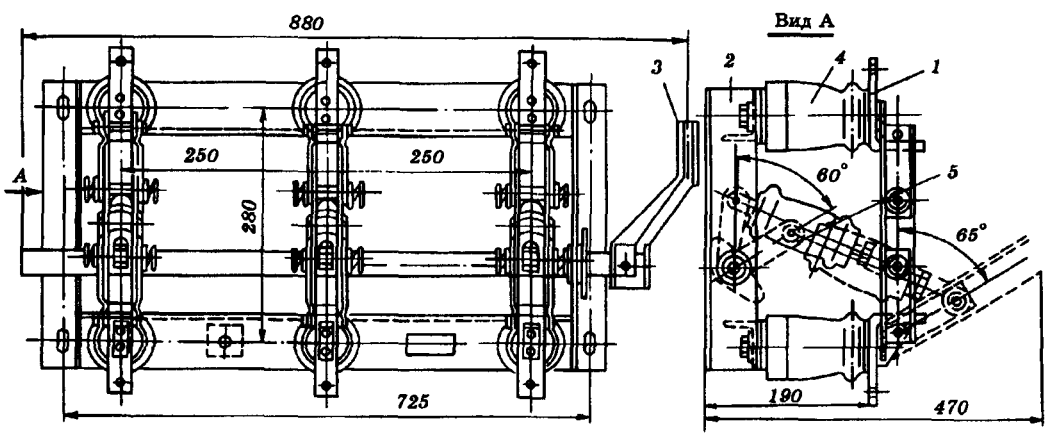


Рис. 32.8. Разъединитель трехполюсный РВ

РЛВОМ — однополюсный разъединитель с линейным контактом (Л) для внутренней установки (В), модернизированный (М).

РВФ — разъединитель внутренней установки, с фигурным исполнением токопровода (Ф).

РВЗ — разъединитель внутренней установки с заземляющим ножом (З).

РЛНД — разъединитель с линейным контактом (Л), для наружной устаиовки (Н), с двумя колонками (Д).

РНД(З) — разъединитель наружиой установки (Н), с двумя колонками (Д) и заземляющим ножом (З).

Устройство, принцип действия, проектирование приводов к разъединителям рассмотрены в [32.2, 32.9, 32.10]. Некоторые приводы представлены в [32.13].

Для управления однополюсными разъединителями внутренней установки напряжением до 35 кВ применяется оперативная изолирующая штанга, на

Таблица 32.7. Технические данные разъединителей внутренней установки

Тип разъединителя	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Амплитуда предельного сквозного тока КЗ, кА	Ток термической стойкости, кА / допустимое время протекания, с	Ток термической стойкости, кА / допустимое время протекания, с (для заземляющих ножей)	Масса, кг	Тип привода
РВО-10/400	10	12	400	41	16/3	—	6,3	Штанга
РВО-10/630	10	12	630	52	20/3	—	6,7	То же
РВО-10/1000	10	12	1000	81	31,5/3	—	12,7	" "
РЛВОМ-10/10001 УХЛ2	10	12	1000	81	31,5/3	—	16	ПР-10
РВФ-6/400 У3	6	7,2	400	41	16/4	—	23	ПР-10, ПР-11
РВФ-6/630 У3	6	7,2	630	41	16/4	—	38	То же
РВФ-10/400 У2	6	7,2	400	41	16/4	—	34	" "
РВФ-10/630 У3	6	7,2	630	52	20/4	—	40	" "
РВФ-10/1000 У3	6	7,2	1000	200	40/4	—	64	" "
РВФЗ-6/630 У3	6	7,2	630	52	20/4	20/1	44	" "
РВ-10/630 У3	10	12	630	52	20/4	—	28	" "
РВЗ-10/6301 У3	10	12	630	52	20/4	20/1	33	" "
РВ-10/1000 У2	10	12	1000	100	31,5/4	—	42	" "
РВЗ-10/10001 У3	10	12	1000	100	31,5/4	31,5/1	49	" "
РВ-11/400 Т2	11	12	400	41	16/4	—	39	" "
РВ-11/630 Т2	11	12	630	52	20/4	20/1	45	" "
РВЗ-11/630	11	12	630	52	20/4	—	53	" "
РВ-20/630 У3	20	24	630	52	20/4	—	85	ПР-3
РВ-20/1000 У3	20	24	1000	55	20/4	—	80	То же
РВЗ-1-20/1000 У3	20	24	1000	55	20/4	20/1	96	" "
РВ-35/630 У3	35	40,5	630	51	20/4	20/1	86	" "
РВЗ-1-35/630 У3	35	40,5	630	51	20/4	20/1	97	" "
РВ-35/1000 У3	35	40,5	1000	80	31,5/4	31,5/1	147	" "
РВЗ-1-35/1000 У3	35	40,5	1000	80	31,5/4	31,5/1	171	" "

Таблица 32.8. Технические данные разъединителей переменного тока наружной установки

Тип разъединителя	Амплитуда предельного сквозного тока короткого замыкания, кА	Ток термической стойкости, кА		Масса разъединителя или одного полюса (полюсного исполнения), кг	Тип разъединителя	Амплитуда предельного сквозного тока короткого замыкания, кА	Ток термической стойкости, кА		Масса разъединителя или одного полюса (полюсного исполнения), кг
		главных ножей для времени 3 с	заземляющих ножей для времени 1 с				главных ножей для времени 3 с	заземляющих ножей для времени 1 с	
РЛНД-10/400	25	10	10	61	РНД (З)-150/3200	112	45	45	505
РОН-10К/5000	180	71	—	105	РНД (З)-220/1000	100	40	40	775
РНД (З)-35/1000	63	25	25	81	РНД (З)-220/2000	100	40	40	866
РНД (З)-35/2000	80	31,5	31,5	178	РНД (З)-220/3200	125	50	50	900
РНД (З)-35/3200	125	50	50	240	РНД (З)-320/3200	160	63	63	3 510
РНД (З)-110/1000	80	31,5	31,5	225	РНД (З)-500/3200	160	63	63	4 250
РНД (З)-110/2000	100	40	40	380	РПД-500/3200	160	63	—	6 100
РНД (З)-110/3200	125	50	50	451	РПД-750/3200	160	63	—	9 370
РНД (З)-150/1000	100	40	40	42	РНВ (З)-750П/4000	—	63	—	8 769
РНД (З)-150/2000	100	40	40	500	РНЗ-1150/4000	100	40	—	13 370

одном конце которой укреплен стальной крючок, вдеваемый при включении или отключении в отверстие на ноже разъединителя или в отверстие рычага на его валу.

Для управлеиия трехполюсными разъединителями внутренней установки применяется ручной привод типа ПР-10, имеющий два исполнения: с нормальной и укороченной ручкой. Для управления разъединителями на большие токи применяется червячный привод типа ПЧ-50.

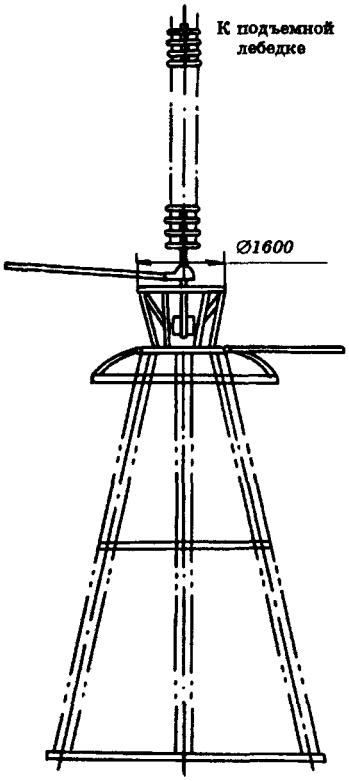


Рис. 32.9. Разъединитель подвесной

Для управления разъединителем наружной установки применяются ручные приводы ПРНЗ (на напряжение 10 кВ) и ПР-10, конструкция которых усложняется при наличии в разъединителе ножей заземления.

Для дистанционного электрического управления разъединителями внутренней и наружной установки используются электродвигательные приводы.

Для управления главными и заземляющими ножами разъединителей наружной установки применяется электродвигательный привод ПДН.

Выбор разъединителей:

1. Номинальное напряжение разъединителя $U_{ном} \geq U_{ном.сети}$, где $U_{ном.сети}$ — номинальное напряжение сети.

2. Номинальный ток разъединителя $I_{ном} \geq I_{ном.расч}$, где $I_{ном.расч}$ — наибольший ток нагрузки установки.

3. Ток динамической стойкости разъединителя (мгновенное значение) $i_{дин} \geq i_{уд}$, где $i_{уд}$ — ударный ток КЗ установки (мгновенное значение тока).

4. Ток термической стойкости разъединителя $I_т$ (действующее значение) в течение времени термической стойкости $t_т$ должен удовлетворять неравенству:

$$I_т^2 t_т \geq I_к^2 t_к,$$

где $I_к$ — действующее значение тока КЗ; $t_к$ — время его протекания.

Аналогично проверяется термическая стойкость заземляющих ножей.

32.5. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Выпускаемые в настоящее время предохранители с кварцевым наполнителем предназначены для защиты электрических цепей переменного тока (серии ПКТ) и трансформаторов напряжения (серии ПКН) на номинальное напряжение от 3 до 35 кВ. Предохранители серий ПКЭ предназначены для защиты силовых электрических цепей переменного тока и трансформаторов напряжения на номинальное напряжение 6 кВ в комплектных распределительных устройствах экскаваторов и передвижных автоэлектростанций.

В условном обозначеиии предохранителя после обозначения серии первая цифра показывает номнальное напряжение, кВ, вторая и третья — пределы значения номинального тока патрона предохранителя, А, последняя цифра — номинальный ток отключения, кА.

Основные технические данные предохраннтелей, а также габаритные, установочные, присоединительные размеры н массы приведены в табл. 32.9 и [32.13]. Защитные характеристики предохранителей серий ПК1 ÷ ПК4 показаны на рнс. 32.10, а размеры — на рис. 32.11. При отключении токов большой кратности по отношению к номинальному току плавкой вставки предохранитель работает с токоограничителем.

Для наружной установки выпускаются предохранители выхлопного типа ПВТ. В этом предохранителе при перегорании плавкой вставки контактный нож освобождается н, откидываясь под действием

Таблица 32.9. Технические данные и размеры предохранителей с кварцевым наполнением

Порядковый номер группы или предохранителя	Типоисполнение	Рис. 32.11	Размеры, мм							Масса, кг
			A	A_1	H	H_1	L	L_1	B	
1	ПКТ101-3-2-31,5-40 У3		185	296	176	100	320	212	77	3,4
2	ПКТ101-6-2-20-40 У3		285	396	176	100	420	312	77	3,9
3	ПКТ101-10-2-20-31,5 У3	*а*	385	496	196	120	520	412	82	4,9
4	ПКТ101-20-2-10-12,5 У3		505	636	286	210	680	512	110	11,1
5	ПКТ101-35-10-3,2 У3		620	736	448	372	760	612	110	17,4
6	ПКТ102-3-40-100-40 У3		230	342	215	100	366	264	84	4,5
7	ПКТ102-6-31,5-50-31,5 У3		330	—	—	—	—	—	—	—
8	ПКТ102-6-80-20 У3	*в*	330	442	215	100	466	364	84	5,0
9	ПКТ102-10-50-12,5 У3		430	542	235	120	566	464	84	6,3
10	ПКТ102-20-16-20-12,5 У3		552	681	325	210	705	562	—	12,7
11	ПКТ102-35-10-20-8 У3		665	781	487	372	805	662	110	19,0
12	ПКТ103-3-160-200-40 У3		230	342	290	—	366	264	84	6,2
13	ПКТ103-6-80-100-31,5 У3		—	—	—	100	—	—	—	—
14	ПКТ103-6-160-20 У3	*б*	330	442	290	—	466	364	84	7,3
15	ПКТ103-10-80-20 У3		430	542	310	120	566	464	84	9,2
16	ПКТ103-20-31,5-50-12,5 У3		552	681	400	210	705	562	110	16,0
17	ПКТ103-35-31,5-40-8 У3		665	781	562	372	805	662	110	22,9
18	ПКТ104-3-315-400-40 У3		248	372	290	—	396	264	184	10,2
19	ПКТ104-6-160-200-31,5 У3		—	—	—	100	—	—	—	—
20	ПКТ104-6-316-20 У3	*г*	348	472	290	—	496	364	184	12,4
21	ПКТ104-10-160-20 У3		448	572	310	120	596	464	184	15,5
22	ПКТ101-6-2-20-40 У1		306	400	246	170	446	324	120	7,7
23	ПКТ101-10-2-20-20 У1	—	406	500	246	170	546	424	120	8,1
24	ПКТ101-20-2-10-12,5 У1		512	641	391	315	665	524	150	21,2
25	ПКН001-10 У3		185	296	196	120	320	212	82	4,2
26	ПКН001-20 У3	*а*	405	536	286	210	560	412	110	10,8
27	ПКН001-35 У3		620	736	448	372	760	612	110	17,4
28	ПКН001-10 У1		302	396	246	170	442	318	120	7,5
29	ПКН001-20 У1		508	636	391	315	660	518	150	21,0
30	ПКН001-35 У1		724	936	516	440	960	618	175	40,5
31	ПКЭ106-6-5-20-20 У2		302	416	180	100	440	318	88	4,3
32	ПКЭ106-10-5-20-12,5 У2	—	402	516	200	120	540	418	96	5,8
33	ПКЭ107-6-31,5-50-31,5 У2		352	466	196	100	490	368	94	5,6
34	ПКЭ107-10-31,5-40-12,5 У2		452	566	216	120	590	468	100	7,3
35	ПКЭ108-6-80-100-31,5 У2		352	466	268	100	490	368	94	8,6
36	ПКЭ108-10-50-80-12,5 У2		452	566	288	120	590	468	100	11,0

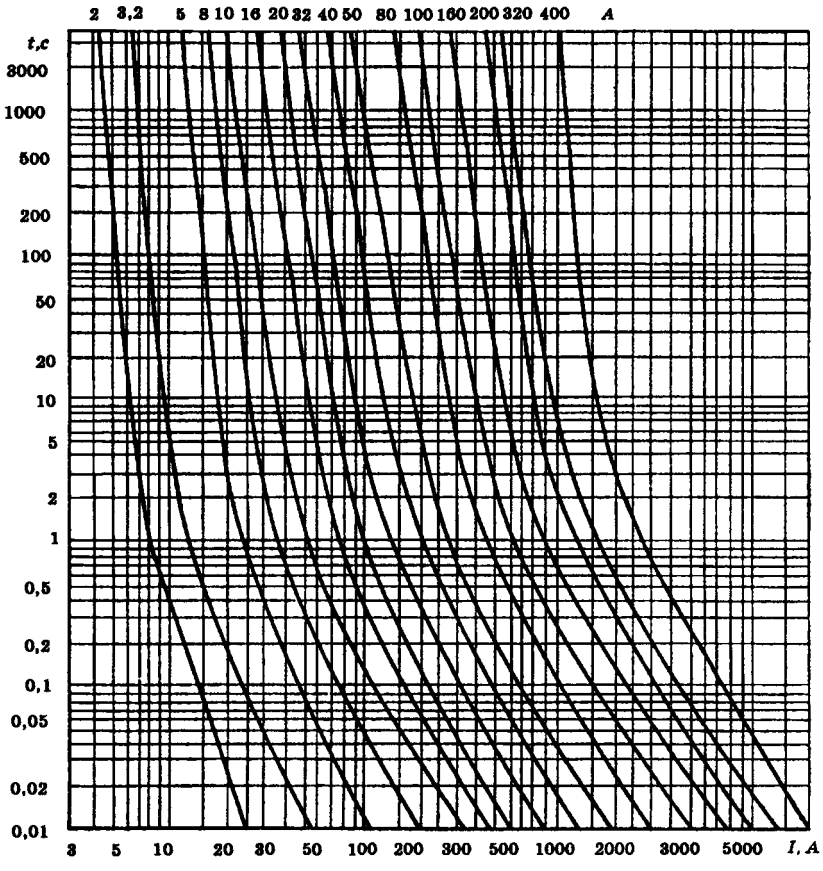


Рис. 32.10. Защитные характеристики предохранителей серий ПК1—ПК4

своей пружины, тянет гибкую связь. В результате этого на месте перегоревшей плавкой вставки возникает дуга. Под действием дуги стенки винипластовых трубок выделяют газ, повышающий давление в трубке и создающий продольно-поперечное дутье. Гибкая связь под действием пружины и выделяющихся газов выбрасывается из патрона. После отключения между ножом и концом трубки образуется воздушный промежуток, обеспечивающий надежную изоляцию в месте разрыва. Технические данные выхлопных предохранителей приведены в табл. 32.10.

Таблица 32.10. Технические данные предохранителей выхлопного типа ПВТ-104

Тип предохранителя	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Номинальный ток отключения, кА	Масса, кг
ПВТ 104-10	10	До 100	5	23
ПВТ 104-35	35	До 100	3,2	65,5
ПВТ 104-110	110	До 50	2,5	804 (трех полюсов)

Выбор предохранителей:

1. Номинальное напряжение предохранителя $U_{ном} \geq U_{ном.сети}$, где $U_{ном.сети}$ — номинальное напряжение сети.

2. Номинальный ток предохранителя $I_{ном} \geq I_{ном.уст}$, где $I_{ном.уст}$ — номинальный ток установки.

3. Номинальный ток отключения $I_{ном.о} \geq I_{п.ож}$, где $I_{п.ож}$ — периодическая составляющая ожидаемого тока КЗ.

4. Предохранители, установленные в цепях двигателей, должны проверяться по пусковому току двигателя (не должны перегорать при нормальном пуске).

5. При включении нескольких предохранителей последовательно они должны проверяться на селективность (вначале сгорает предохранитель, ближайший к месту КЗ) [32.5].

6. Предохранитель, расположенный в первичной цепи силового трансформатора, должен выдерживать 10-кратный номинальный первичный ток ($10I_{1ном}$ в течение 0,1 с).

7. Времятоковая характеристика предохранителя должна идти ниже времятоковой характеристики нагрузки.

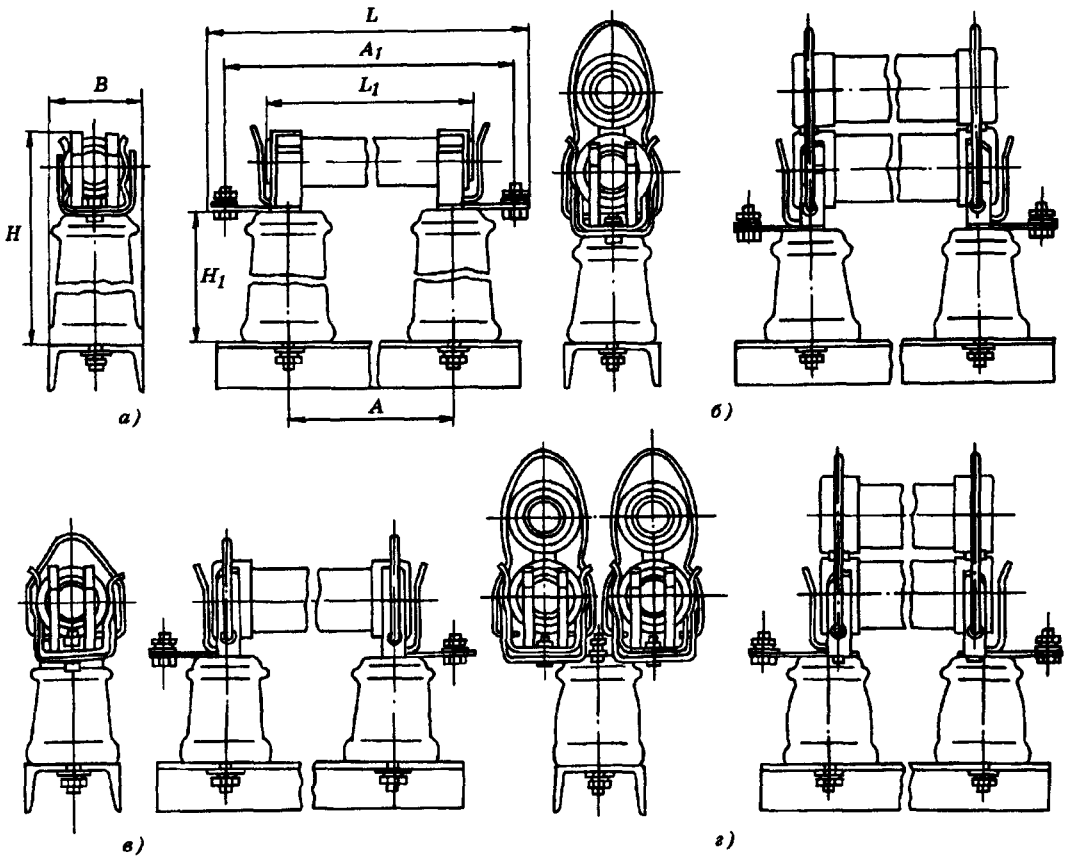


Рис. 32.11. Габаритные, установочные и присоединительные размеры предохранителей серий ПК1÷ПК4

32.6. РАЗРЯДНИКИ И ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

РАЗРЯДНИКИ

Для защиты линейной изоляции от атмосферных перенапряжений применяются трубчатые разрядники (табл. 32.11 и 32.12, рис. 32.12), вентильные разрядники и ограничители перенапряжений (для защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений).

Трубчатые разрядники выпускаются на номинальное напряжение от 3 до 110 кВ. Разрядники серии РВС (разрядник вентильный станционный) служат для защиты от атмосферных перенапряженнй. Технические данные разрядников (РВС), размеры и масса приведены в табл. 32.13 и 32.14. Общий вид некоторых разрядников этой серии дан на рис. 32.13 и 32.14.

Для защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений применяются разрядники серии РВМК-330П и РВМК-500П (разрядник вентильный, с магнитным гашением дуги, комбинированный, с повышенным напряжением гашения). Технические данные приведены в табл. 32.15. Общий вид разрядника РВМК-500П дан на рис. 32.15.

Таблица 32.11. Основные технические данные разрядников серии РТВ (трубчатый винипластовый)

Типоисполнение	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее допустимое напряжение, кВ (действующее значение)	Ток отключения, кА (действующее значение)		Размеры искровых промежутков, мм		Масса, кг
			Нижний предел	Верхний предел	внешнего S_2	внутреннего S_1	
РТВ-10-0,5/2,5 У1	10*	12	0,5	2,5	15	60	2,35
РТ-10-2/10 У1	10*	12	2,0	10,0	15	60	2,32
РТВ-20-2/10 У1	20	24	2,0	10,0	40	100	2,55
РТВ-35-2/10 У1	35	40,5	2,0	10,0	100	140	2,85

* Могут применяться в сети 6 кВ при длине внешнего искрового промежутка 10 мм.

Таблица 32.12 Основные технические данные разрядников серии РТФ (трубчатый фибробакелитовый)

Типоисполнение	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее допустимое напряжение, кВ	Ток отключения, кА (действующее значение)		Размеры искровых промежутков, мм		Масса, кг
			Нижний предел	Верхний предел	внешнего S_2	внутреннего S_1	
РТФ-3-0,3/5 УХЛ1	3	3,6	0,3	5,0	10	75	1,38
РТФ-6-0,5/10 УХЛ1	6	7,2	0,5	10,0	20	150	1,6
РТФ-10-0,2/1 УХЛ1	10	12	0,2	1,0	25	225	1,6
РТФ-10-0,5/5 УХЛ1	10	12	0,5	5,0	25	150	1,6
РТФ-35-1/5 УХЛ1	35	40,5	0,5	2,5	130	250	2,34
РТФ-35-0,5/2,5 УХЛ1	35	40,5	1,0	5,0	130	200	2,36
РТФ-35-2/10 УХЛ1	35	40,5	2,0	10,0	130	220	3,96

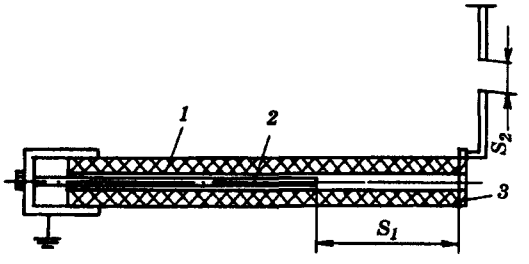


Рис. 32.12. Трубчатый разрядник

1 — внешнепластовая трубка; *2* — стержневой электрод, *3* — кольцевой электрод; S_1 — внутренний разрядный промежуток; S_2 — внешний разрядный промежуток

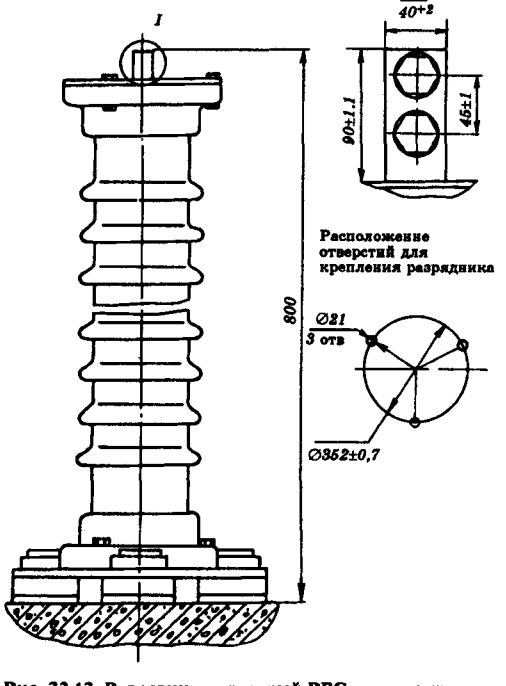


Рис. 32.13. Разрядник вилитовый РВС на напряжение 13,8 кВ

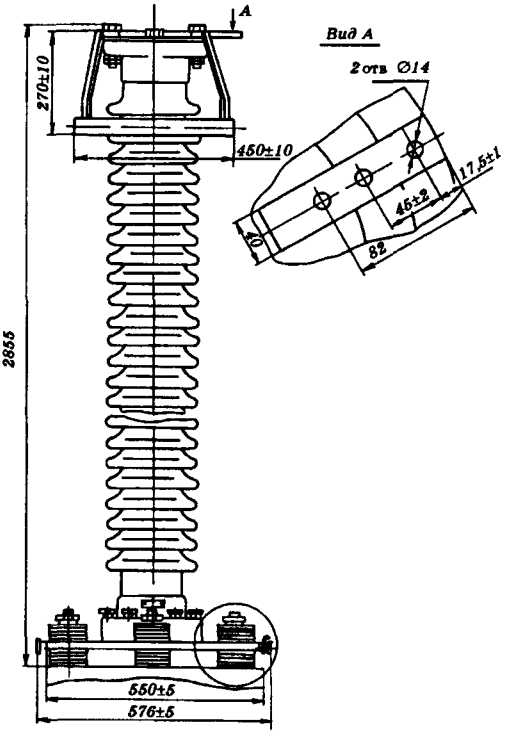


Рис. 32.14. Разрядник вилитовый РВС на напряжение 220 кВ

Разработаны и выпускаются разрядники для защиты установок постоянного тока с номинальным напряжением от единиц киловольт до 800 кВ

ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Создание новых высоколинейных резисторов на базе оксидно-цинковых материалов позволило разработать ограничители перенапряжений (ОПН), выполняющих ту же функцию, что и вентильные разрядникн В отличие от вентильных разрядников ОПН не имеют искровых промежутков и присоединяются непосредственно к линии или защищаемому объекту. Технические данные некоторых ОПН при-

Таблица 32.13. Размеры и масса разрядников серии РВС

Тип разрядника	Высота, мм, не более		Масса, кг
РВС-13,8Т1	800	—	43
РВС-15	800	—	49
РВС-15Т	800	—	49
РВС-20	960	—	58
РВС-20Т	960	—	58
РВС-22Т	860	—	44
РВС-33Т1	960	—	59
РВС-60	2370	—	105
РВС-66 изол.	2530	—	140
РВС-66Т1 изол.	2530	—	140
РВС-110М	3100	—	175
РВС-132МТ1	3290	2110	326
РВС-150М	3460	2080	338
РВС-220М	4620	2970	497
РВС-230МТ1	4620	2970	497

ведены в табл. 32.16. ОПН выпускаются на широкую гамму напряжений — от 0,04 кВ до 500 кВ. Общий вид ОПН на напряжение 220 кВ представлен на рис. 32.16.

ВЫБОР РАЗРЯДНИКОВ И ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Трубчатые разрядники

1. Номинальное напряжение разрядника $U_{ном.разр}$ должно соответствовать номинальному напряжению сети $U_{ном.сети}$.

2. Токи короткого замыкания, возникающие при срабатывании разрядника, должны находиться в пределах токов, отключаемых разрядником.

3. Искровые промежутки S_1 и S_2 берутся в соответствии с данными табл. 32.11 и 32.12.

Вентильные разрядники и ограничители перенапряжения

1. Номинальное напряжение $U_{ном}$ разрядника или ограничнтеля перенапряжения должно быть равно номинальному напряжению сети $U_{ном.сети}$.

2. Расстояние до защищаемого объекта выбирается в завнсимости от номинального напряжения сети, схемы установки и типа разрядника в соответствии с ПУЭ [32.11].

Таблица 32.14. Технические данные разрядников серии РВС на напряжение 13,8÷220 кВ

Тип	Класс напряжения разрядника, кВ	Номинальное напряжение разрядника, кВ	Пробивное напряжение при частоте 50 Гц в сухом состоянии и под дождем, кВ (действующее значение)		Импульсное напряжение при предразрядном времени от 8 до 20 мкс, кВ, не более	Остающееся напряжение, кВ, при импульсном токе с длиной фронта волны 8 мкс с амплитудой, А			Типовая комплектация — число элементов × допустимое напряжение, кВ
			не менее	не более		3000	5000	10 000	
РВС-13,8Т1	13,8	17	34	42	61	51	55	60	1×17
РВС-15, РВС-15Т1	15	18	38	48	67	57	61	67	1×19
РВС-20, РВС-21	20	24	49	60,5	80	75	80	88	1×25
РВС-22Т1	22	20	40	50	70	60	65	73	1×20
РВС-33Т1	33	29	58	70	94	88	94	102	1×29
РВС-35	35	40,5	78	98	125	122	130	143	1×41,5
РВС-60, РВС-66Т1	60	65,9	134	169	215	207	221	243	1×19+2×25
РВС-66, РВС-66Т1	66	58	116	140	188	176	188	204	2×29
РВС-66	66	72	150	182	232	226	242	264	3×25
РВС-110М, РВС-110МТ	110	102	200	250	285	315	335	367	3×33,3
РВС-132МТ1	132	119,7	232	267	376	378	404	444	4×19+2×25
РВС-150М1, РВС-150МТ1	150	138	208	250	375	435	465	510	3×33,3+2×19
РВС-220М, РВС-220МТ1	220	198	400	500	530	630	670	734	6×33,3
РВС-230МТ1	230	204,5	400	500	530	630	679	734	6×33,3

Таблица 32.15. Технические данные разрядников РВМК-330П и 500П

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее допустимое напряжение на разряднике при атмосферных перенапряженнях, кВ	Напряжение гашения при коммутационных перенапряжениях, кВ	Пробивное напряжение при частоте 50 Гц в сухом состоянии и под дождем, кВ		Импульсное пробивное напряжение (предразрядное время 2÷200 мкс), кВ
				не менее	не более	
РВМК-330П	330	290	380	435	300	760
РВМК-500П	500	420	575	660	760	1070

Окончание табл. 32.15

Тип	Напряжение переключения при атмосферных перенапряжениях, кВ		Остающееся напряженне, кВ			
			при токе в один полупериод частоты 50 Гц, А		при импульсном токе с длиной фронта 8 мкс с амплитудой, А, не более	
	не менее	не более	1000, не менее	1500, не более	6000	10 000
РВМК-330П	720	820	650	700	720	1070
РВМК-500П	1130	1260	1020	1070	840	1260

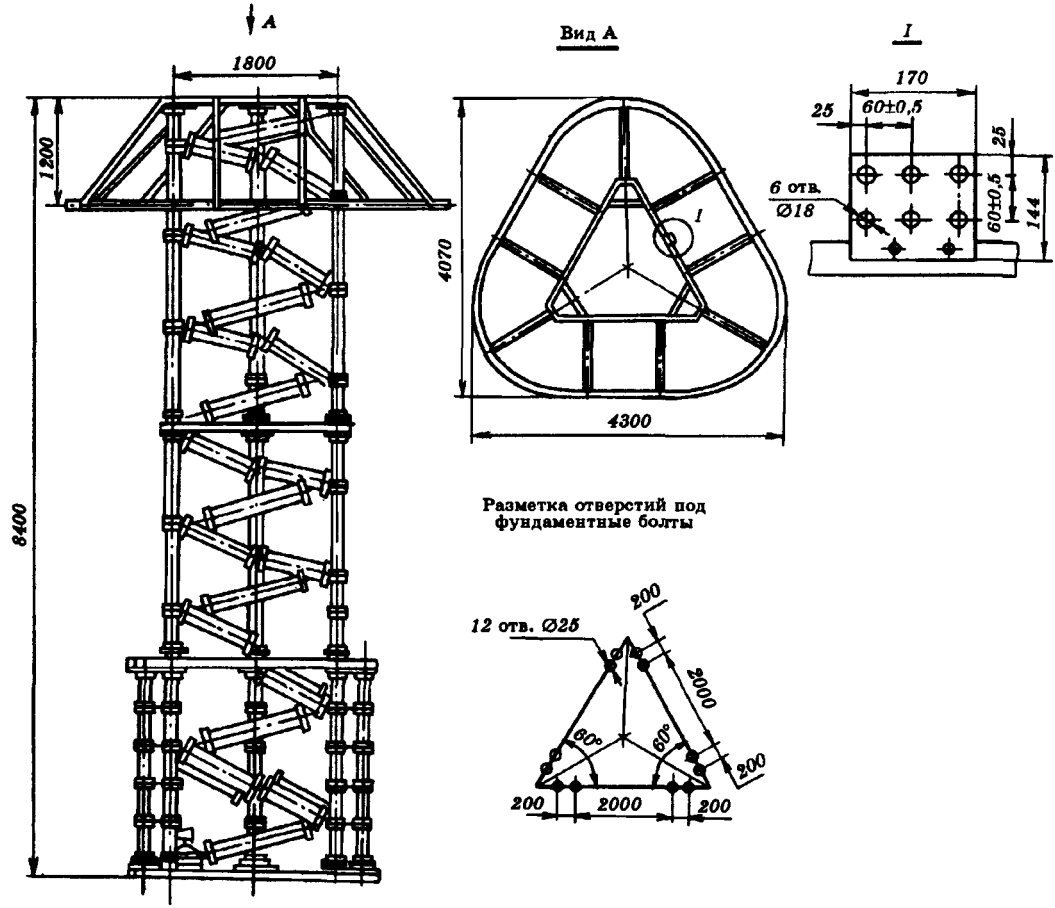
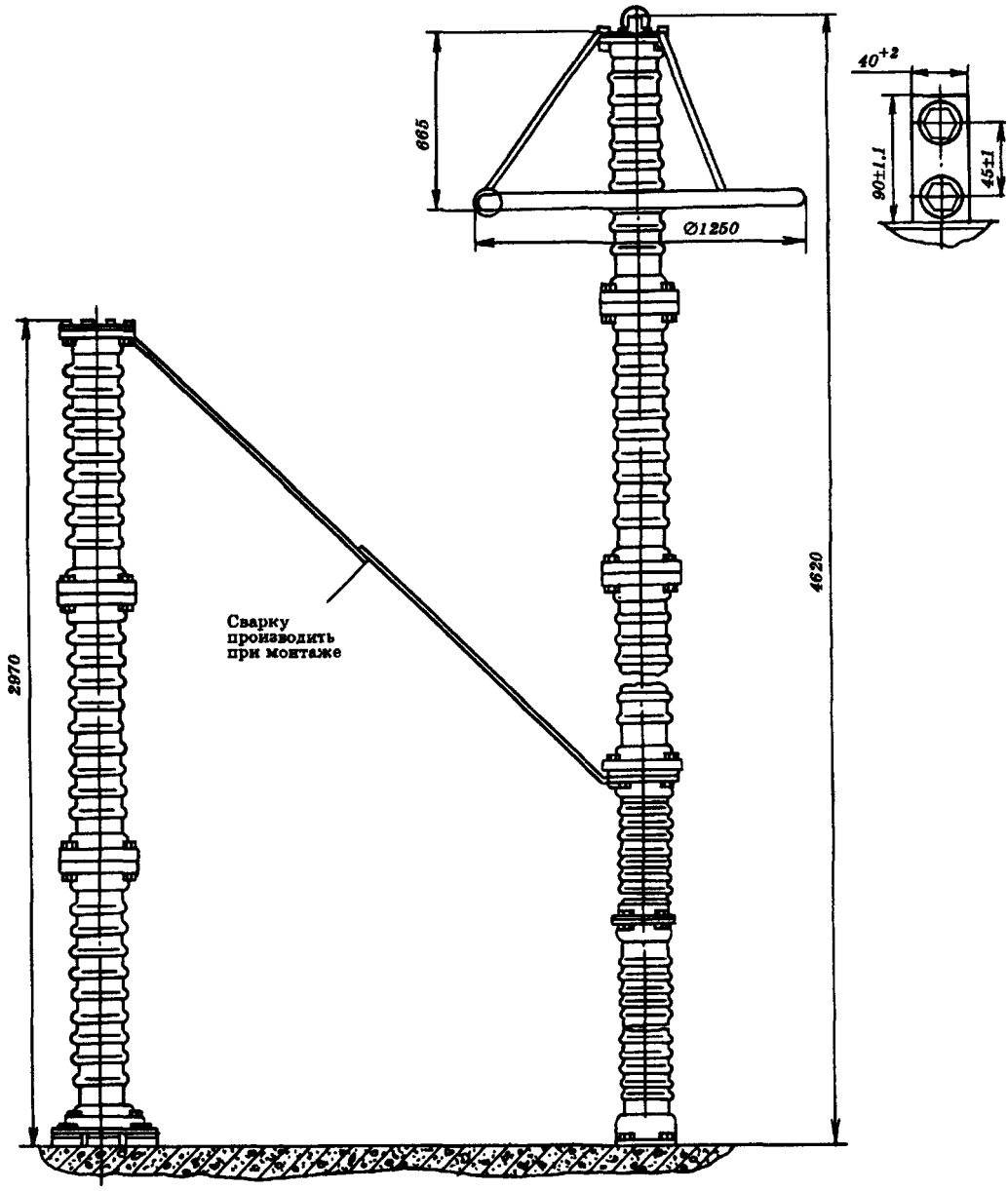


Рис. 32.15. Разрядник РВМК-500



Расположение отверстий для укрепления разрядника

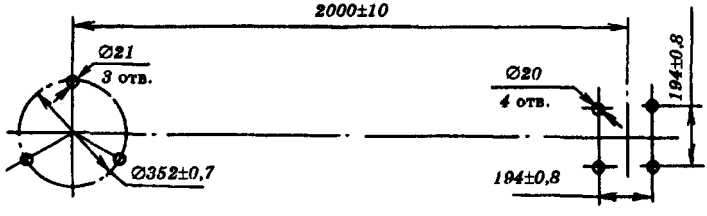


Рис. 32.16. Ограничитель перенапряжений ОПН-220

Таблица 32.16. Технические данные ограничителей перенапряжений ОПН-110, ОПН-220, ОПН-500

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ	Напряжение на ОПН, кВ, допустимое в течение					Расчетный ток коммутационного перенапряжения, А
			20 мин	20 с	3,5 с	1,0 с	0,15 с	
ОПН-110ХЛ1	110	73	88	95	100	105	112	280
ОПН-220ХЛ1	220	146	175	190	200	210	225	420
ОПН-500ХЛ1	500	303	365	390	420	420	470	1200

Окончание табл. 32.16

Тип	Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ		Остающееся напряжение, кВ, при импульсном токе с длиной фронта волны 8 мкс с амплитудой, А, не более			Масса, кг	Высота ОПН, мм
	не менее	не более	3000	5000	10 000		
ОПН-110ХЛ1	175	190	230	250	280	115	1525
ОПН-220ХЛ1	355	380	430	460	500	250	2855
ОПН-500ХЛ1	720	770	825	860	920	1700	5550

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

32.1. **ГОСТ 687-78.** Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. М.: Изд-во стандартов, 1978.

32.2. **Чунихин А.А., Жаворонков М.А.** Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.

32.3. **Электрические** аппараты высокого напряжения / Под ред. Г.Н. Александрова. Л.: Энергоатомиздат, 1989.

32.4. **Выбор** электрических аппаратов для промышленных установок / А.А. Чунихин, Е.Г. Акимов, Ю.С. Коробков и др. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

32.5. **Чунихин А.А.** Электрические аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1988.

32.6. **Афанасьев В.В., Вишневский Ю.И.** Воздушные выключатели. Л.: Энергоатомиздат, 1982.

32.7. **Проектирование** электрических аппаратов / Под ред. Г.Н. Александрова. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

32.8. **Основы** теории электрических аппаратов / Под ред. И.С. Таева. М.: Высшая школа, 1987.

32.9. **Афанасьев В.В., Якунин Э.Н.** Разъединители. Л.: Энергия, 1979.

32.10. **Евтушенко В.А., Чунихин А.А.** Подвесные разъединители. М.: Энергоатомиздат, 1989.

32.11. **Правила** устройства электроустановок. 6-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986.

32.12. **Чунихин А.А.** Электрические аппараты высокого напряжения: Справочник. Т.1. Выключатели. М.: Информэлектро, 1994.

32.13. **Электротехнический** справочник. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986.

32.14. **Чунихин А.А.** Электрические аппараты высокого напряжения: Справочник. Т.2. Выключатели. М.: Информэлектро, 1996.

Раздел 33

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

33.1. Назначение и основные параметры трансформаторов тока (ТТ) 319
Назначение (319). Условные обозначения (319). Основные параметры (319).
33.2. Выбор ТТ 322
33.3. Назначение и основные параметры трансформаторов напряжения (ТН) . . 332
Назначение (332). Основные обозначения (332). Основные параметры (332).
33.4. Выбор ТН 334
Список литературы 337

33.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА (ТТ)

НАЗНАЧЕНИЕ

Для измерения тока в установках высокого напряжения и изоляции измерительных приборов и устройств релейной защиты от высокого напряжения служат трансформаторы тока. Через первичную обмотку пропускают первичный ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам и реле. Первичная обмотка изолирована от вторичной в соответствии с классом изоляции аппарата (на полное напряжение).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

I_1 — первичный ток (действующее значение), А;

I_2 — вторичный ток (действующее значение), А;

ΔI — токовая погрешность, %;

δ — угловая погрешность, мин;

$K_{ном} = I_{1ном}/I_{2ном}$ — номинальный коэффициент трансформации;

$U_{ном}$ — номинальное напряжение трансформатора, кВ;

$w_{2ном} = w_{1ном}/K_{ном}$ — номинальное число витков вторичной обмотки;

I_0 — намагничивающий ток (действующее значение), А;

E_2 — ЭДС вторичной обмотки, В;

$r_{2т}$ — активное сопротивление вторичной обмотки, Ом, в Т-образной схеме замещения;

$x_{2т}$ — реактивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки в Т-образной схеме замещения, Ом;

α — угол между ЭДС вторичной обмотки и вторичным током;

ψ — угол потерь магнитопровода;

R_2 — активное сопротивление нагрузки, Ом;

X_2 — реактивное сопротивление нагрузки, Ом;

Z_2 — сопротивление нагрузки, Ом;

$Z_{2вт}$ — полное сопротивление вторичной цепи, Ом;

I'_1 — первичный ток, приведенный к вторичной обмотке, А;

I'_0 — ток намагничивания, приведенный к вторичной обмотке, А;

E'_1 — ЭДС первичной обмотки, приведенная к вторичной обмотке, В;

r'_1 — активное сопротивление первичной обмотки, приведенное к вторичной обмотке, Ом;

x'_1 — реактивное сопротивление первичной обмотки, приведенное к вторичной обмотке, Ом;

r'_0 — активное сопротивление ветви намагничивания, прнведенное к вторичной обмотке, Ом;

x'_0 — реактивное сопротивление ветви намагничивания, приведенное к вторичной обмотке, Ом;

Ф — магнитный поток в сердечнике, Тл;

U'_1 — напряжение на первичной обмотке, В;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке, В.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В соответствии с ГОСТ 7746-78 принято такое положительное направление токов в обмотках, при котором в случае отсутствия погрешности первичный и вторичный токи совпадают по фазе (рис. 33.1).

Токовая погрешность, %

$$\Delta I = \frac{K_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100.$$

При небольшой токовой погрешности (не более 10%) и числе витков вторичной обмотки равным

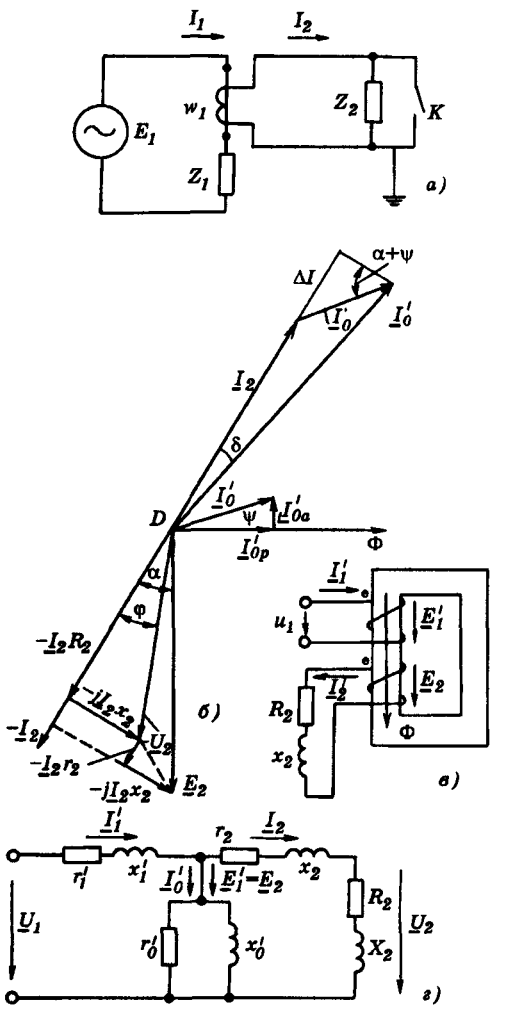


Рис. 33.1. Схема включения ТТ (*а*), векторная диаграмма (*б*), условное положительное направление электрических величин (*в*), схема замещения ТТ (*г*)

номинальному числу витков ($w_2 = w_{2ном}$), можно написать

$$\Delta I = -\frac{I_0 w_1}{I_1 w_1}\sin(\alpha+\psi)100 =$$

$$= -\frac{I_0}{I_1}\sin(\alpha+\psi)100,\ \%.$$

Если $w_2 \neq w_{2ном}$, то уравнение токовой погрешности имеет вид

$$\Delta I = \left[-\frac{I_0 w_1}{I_1 w_1}\sin(\alpha+\psi) - \frac{w_2 - w_{2ном}}{w_{2ном}}\right]100.$$

Класс точности определяется токовой погрешностью при первичном токе $I_1 = (1\div1{,}2)I_{1ном}$, вторичной нагрузке $(0{,}25\div1)Z_{2ном}$ и $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ (классы 0,2÷1) и $(0{,}5\div1)Z_{2ном}$ и $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ (классы 3, 5, 10).

Угловая погрешность ТТ — угол между векторами первичного и вторичного токов. Угловая погрешность выражается в минутах или сантирадианах и считается положительной, когда вектор вторичного тока опережает вектор первичного тока.

Угловая погрешность, мин:

$$\delta' = 3440\frac{I_0 w_1}{I_1 w_1}\cos(\alpha+\psi) = 3440\frac{I_0}{I_1}\cos(\alpha+\psi).$$

Полная погрешность, %, в условиях установившегося режима — действующее значение разности между произведением номинального коэффициента трансформации на мгновенное значение вторичного тока и мгновенным значением первичного тока, отнесенное к действующему значению первичного тока и умноженное на 100:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (K_{ном} i_2 - i_1)^2 dt},$$

где T — период тока, с.

Токовой и угловой погрешностью пользуются при оценке работы ТТ в номинальном режиме ($I_1 \leq I_{1ном}$). При коротких замыканиях в сети ($I_1 >> I_{1ном}$) пользуются полной погрешностью, которая по существу есть отношение намагничивающего тока I_0 к первичному току I_1:

$$\varepsilon = \frac{I_0}{I_1}100.$$

Основные номинальные параметры, требования к точности и значению вторичной нагрузки ТТ приведены в табл. 33.1, [33.1]. Первичный ток может быть больше номинального на 5÷20% [33.1].

Вторичная нагрузка ТТ — полное сопротивленне внешней вторичной цепи в омах с указанием коэффициента мощности (Z_2 и $\cos\varphi_2$). Вторичная нагрузка может характеризоваться также полной мощностью в вольт-амперах при данном коэффициенте мощности и номинальном вторичном токе.

Номинальная вторичная нагрузка — вторичная нагрузка с коэффициентом мощности 0,8, при которой трансформатору гарантируется класс точности или предельная кратность.

Предельная кратность K_5 или K_{10} — отношенне первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает соответственно 5 или 10%.

Номинальная предельная кратность $K_{5ном}$ или $K_{10ном}$ — гарантируемая ТТ предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке. Кривые предельной кратности приведены в каталогах на ТТ.

Ток термической стойкости — наибольшее действующее значение тока короткого замыкания за промежуток времени $t_к$, которое трансформатор тока выдерживает в течение этого промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах короткого за-

Таблица 33.1. Предельные значения погрешности трансформаторов тока для различных классов точности (по ГОСТ 7746-78)

Класс точности	Первичный ток, % номинального	Предельное значение погрешности			Пределы вторичной нагрузки, % номинальной, при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$
		токовой, %	угловой		
			мин	10^{-2} рад	
0,2	*5*	±0,*75*	±30	±0,9	25÷100
	10	±0,50	±20	±0,6	
	20	±0,*25*	±*15*	±0,*45*	
	100÷120	±0,20	±10	±0,3	
0,*5*	*5*	±1,*5*	±90	±2,7	25÷100
	10	±1,0	±60	±1,8	
	20	±0,*75*	±*45*	±1,*35*	
	100÷120	±0,*5*	±30	±0,9	
1	*5*	±3,0	±180	±5,4	25÷100
	10	±2,0	±120	±3,6	
	20	±1,*5*	±90	±2,7	
	100÷120	±1,0	±60	±1,8	
3	50÷120	±3,0	Не нормируется		50÷100
5		±*5*,0			
10		±10			

Примечание. Погрешности ТТ не должны выходить за пределы ломаной линии, состоящей из отрезков, проведенных через точки предельных погрешностей.

мыкания; и без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Для ТТ на номинальное напряжение $U_{ном}$ = = 330 кВ термическая стойкость оценивается током односекундной или двухсекундной стойкости ($I_{1т}$, $I_{2т}$) или его отношением к номинальному току ($K_{1т}$, $K_{2т}$). Соответственно для ТТ на напряжения до 220 кВ включительно — током трехсекундной стойкости $I_{3т}$ или отношением $K_{3т}$.

Ток электродинамической стойкости — наибольшее амплитудное значение тока короткого замыкания, которое ТТ выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Электродинамическая стойкость может быть задана отношением амплитуды ударного тока короткого замыкания сети $i_у$ к амплитуде номинального тока

$$k_{дин} = i_у / I_{1ном}\sqrt{2},$$

где $I_{1ном}\sqrt{2}$ — амплитуда первичного номинального тока.

Между токами электродинамической и термической стойкости должны выдерживаться соотношения:

$$i_у \geq 1{,}8\sqrt{2}\, I_{2т} \text{ для } U_{ном} \geq 330 \text{ кВ};$$

$$i_у \geq 1{,}8\sqrt{2}\, I_{3т} \text{ для } U_{ном} \text{ до } 220 \text{ кВ включительно.}$$

Точность работы защитного ТТ характеризуется полной погрешностью ε, %. При номинальной нагрузке $Z_{2ном}$ и номинальной предельной кратности *полная погрешность* ε не должна превышать *5 или*

Таблица 33.2

Класс точности	Пределы допускаемых погрешностей			
	При номинальном первичном токе			Полная погрешность, %, при токе *номинальной* предельной кратности
	Токовая погрешность, %	Угловая погрешность		
		мин	10^{-2} рад	
5	±1	±60	±1,8	*5*
10	±3	—	—	10

10% в зависимости от класса точности. При дальнейшем росте первичного тока наблюдается резкое возрастание намагничивающего тока и полной погрешности. Погрешности ТТ для защиты даны в табл. 33.2.

Термическая и электродинамическая стойкости должны обеспечиваться при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

Трансформаторы тока по конструктивному оформлению делятся на ТТ внутренней установки, работающие в закрытых распределительных устройствах и КРУ и ТТ для наружной установки. В последнем случае они подвержены воздействию дождя, снега, загрязнению изоляции пылью из окружающего воздуха.

Трансформаторы тока наружной установки подвержены дополнительным механическим воздействиям ветра и тяжения проводов, которыми они присоединяются к цепи. Расчетная скорость ветра 30 м/с, сила тяжения до 500 Н при $U_{ном} \leq 35$ кВ, до 1000 Н при $U_{ном}$ = 110÷220 кВ, до 1500 Н при $U_{ном}$ = = 330 кВ.

При номинальном напряжении $U_{ном} \geq 3$ кВ требования к изоляции должны соответствовать ГОСТ

1516.1-76 и ГОСТ 9920-75. При $U_{ном}$ = 0,66 кВ испытательное одноминутное напряжение для первичной обмотки 3, для вторичной — 2 кВ.

Междувитковая изоляция вторичной обмотки должна выдерживать без пробоя в течение 1 мин напряжение, индуктируемое в обмотке при разомкнутых ее выводах. Значение первичного тока равно номинальному в том случае, если напряжение на разомкнутых выводах $U_{2раз} \le 3{,}5$ кВ. Если $U_{2раз} > 3{,}5$ кВ при токе $I_1 = I_{1ном}$, то при испытаниях устанавливается первичный ток такого значения, чтобы $U_{2раз} = 3{,}5$ кВ.

Методика расчета ТТ с конкретными примерами приведена в [33.4, 33.11].

33.2. ВЫБОР ТТ

Трансформатор тока служит для преобразования измеряемого первичного тока I_1 во вторичный I_2. В установках высокого напряжения ($U_{ном} > 1000$ В) ТТ изолирует цепь измерительных и защитных устройств от цепи высокого напряжения. Схема включения ТТ приведена на рис. 33.1, *а*. Первичная обмотка w_1 включается в цепь последовательно с нагрузкой Z_1. Начало вторичной обмотки присоединяется к нагрузке Z_2. При замене нагрузки Z_2 или размыкании цепи нагрузки включается контакт K для того, чтобы избежать режима разомкнутой вторичной обмотки, который для ТТ является аварийным режимом.

Для ТТ:

1. Номинальное напряжение ТТ $U_{ном} \ge U_{ном.с}$, где $U_{ном.с}$ — номинальное напряжение сети. В сети с заземленной нейтралью к ТТ приложено фазное напряжение, а в сети с изолированной нейтралью может быть приложено линейное напряжение (если произошло замыкание одной фазы на землю).

2. Частота тока, указанная на щитке, должна соответствовать частоте сети. Для трансформаторов с $U_{ном} \le 20$ кВ, $I_{1ном} = 3000$ А и $f = 50$ Гц допускается работа при частоте до 500 Гц. При этом сопротивление нагрузки может быть удвоено по сравнению с сопротивлением при частоте $f = 50$ Гц при сохранении класса точности.

3. Номинальный первичный ток ТТ берется в соответствии со шкалой токов, рекомендованной ГОСТ [33.1]. Если ток установки не соответствует этой шкале, то берется трансформатор с ближайшим большим током. Значительное превышение номинального первичного тока ТТ по сравнению с током установки ведет к повышению погрешности.

4. Электродинамическая и термическая стойкости должны удовлетворять следующим условиям:

динамическая стойкость

$$k_{дин} \ge i_y / \sqrt{2}\, I_{1ном},$$

где $k_{дин}$ — коэффициент электродинамической стойкости; i_y — амплитуда ударного тока короткого замыкания сети; $I_{1ном}$ — действующее значение номинального первичного тока;

термическая стойкость

$$I_к^2 t_к \le I_т^2 t_т,$$

$k_т$ — коэффициент термической стойкости, равный $I_т / I_{1ном}$ при времени стойкости $t_т$; $I_к$ — действующее значение тока КЗ при времени его действия $t_к$.

Если выбранный ТТ удовлетворяет п.3, но не проходит по п.4, то необходимо либо взять ТТ на больший первичный номинальный ток, либо перейти на другой тип ТТ, имеющий более высокую стойкость к токам короткого замыкания. В первом случае увеличивается погрешность в номинальном режиме.

5. Класс точности ТТ выбирается в зависимости от назначения. Трансформаторы, предназначенные для питания счетчиков электроэнергии, должны иметь класс точности не ниже 0,5. Допускается для этой цели использование ТТ класса точности 1,0, но при условии, что фактическая погрешность соответствует классу 0,5 (благодаря пониженной вторичной нагрузке). К этим трансформаторам не предъявляется требование высокой предельной кратности. Иногда даже полезно насыщение магнитопровода для уменьшения термического и электродинамического воздействия на измерительные приборы.

6. Трансформатор, предназначенный для систем защиты от коротких замыканий, должен иметь погрешность, обеспечивающую устойчивую работу релейной защиты. Для оценки работы ТТ в этом режиме используются кривые предельной кратности

При заданной вторичной нагрузке Z_2 предельвая кратность трансформатора должна быть выше расчетной кратности $m_{расч}$ (отношение тока короткого замыкания, при котором срабатывает защита, к номинальному току ТТ). Трансформаторы, комплектуемые для дифференциальной защиты, должны иметь одинаковую предельную кратность при сквозном токе короткого замыкания. Значение $m_{расч}$ зависит от принципа действия защиты.

Сопротивление нагрузки Z_2 должно быть не более $Z_{2ном}$, и для простейшей однофазной схемы включения ТТ, Ом,

$$Z_2 = \sqrt{\left(\sum x_{приб}\right)^2 + \left(\sum R_{приб} + R_{пров} + R_{конт}\right)^2},$$

где $\sum x_{приб}$ — суммарное реактивное сопротивление всех приборов нагрузки, Ом; $\sum R_{приб}$ — суммарное активное сопротивление приборов нагрузки, Ом; $R_{конт} = 0{,}05 \div 1$ Ом — сопротивление контактных соединений; $R_{пров}$ — сопротивление проводов, Ом.

Сечение соединительных проводов при данной длине l, м, определяется из выражения

$$q = \rho\, l / R_{пров},$$

где q — сечение провода, м^2; ρ — удельное сопротивление проводов, мкОм·м.

Обмотки тока всех приборов фазы соединяются последовательно.

По условиям механической прочности сечение медных проводов должно быть не менее 1,5 мм^2, а алюминиевых — не менее 2,5 мм^2.

При соединении ТТ в трехфазные группы по различным проводам протекают различные токи. Поэтому для расчета сечения соединительных проводов необходимо выбрать такой режим, при котором нагрузка на ТТ получается наибольшей [33.6].

7. При использовании встроенных ТТ, имеющих несколько магнитопроводов с обмоткой, часто возникает необходимость увеличения либо допустимой вторичной нагрузки ТТ (велика длина соединительных проводов), либо вторичного тока в нагрузке до номинального значения (из-за того, что номинальный ток установки значительно ниже первичного тока трансформатора).

В первом случае вторичные обмотки соединяются согласно-последовательно. Если соединяются два ТТ последовательно, то вторичная ЭДС возрастает в 2 раза, что дает возможность увеличить в 2 раза нагрузку Z_2. Соединяемые ТТ должны быть однотипными и иметь одинаковые вторичные токи, равные номинальному току нагрузки.

Во втором случае вторичные обмотки соединяются согласно-параллельно. Ток в нагрузке равен сумме вторичных токов ТТ. Внутренние и внешние параметры параллельно соединяемых ТТ должны быть одинаковыми.

Встроенные ТТ могут иметь вторичную обмотку с отводами. Изменяя число вторичных витков, можно изменять номинальный коэффициент трансформации. При уменьшении числа вторичных витков обмотки вторичный номинальный ток увеличивается. Следует отметить, что в том случае, когда используемая часть вторичной обмотки неравномерно располагается по магнитопроводу, возникает сопротивление рассеяния вторичной обмотки, которое может быть соизмеримо с ее активным сопротивлением. При уменьшении числа вторичных витков погрешность ТТ возрастает [33.3, 33.7].

Технические данные ТТ приведены в табл. 33.3 и 33.4. Внешние виды аппаратов представлены на рис. 33.2÷33.28.

Для измерения постоянного тока в цепях высокого напряжения применяют комплексы трансформаторов постоянного тока типа КТПТ35У1. Эти устройства работают на базе магнитного усилителя.

Таблица 33.3. Технические данные трансформаторов тока внутренней установки

Тип трансформаторв	Варианты исполнения**	Номинальный первичный ток, А	Трехсекундная термическая стойкость или кратность	Электродинамическая стойкость или кратность	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг
					измерительной обмотки	защитной обмотки		
ТЛМ-6	1/10Р 0,5/10Р	300; 400; 600; 800; 1000; 1500	33*	125*	10	15	20	27
ТОЛК-6	1; 10Р	50	40	340	30	30	5,5	11,3
		80	40	340	30	30		
		100; 150; 200	4,6*	26*	30	30		
		300; 400; 600	11*	—	—	—		
ТВЛМ-6	1; 10Р	10; 20; 30; 50; 75; 100	20	350	15	15	4,5	4,5
		150; 200; 300; 400	20	52*				
ТПЛ-10	10Р	30; 50; 75; 100; 150	45	250	10	15	13	10÷19
	0,5/10Р	200	—	—				
	10/10Р	300	45	175				
	10/10Р	400	35	165				
ТПЛУ10	10Р; 0,5/10Р; 10Р/10Р	30; 50; 75; 100	60	250	10	15	13	10÷19
ТПОЛ-10	0,5/10Р	600; 800	32	81	10	15	19; 23	18
		1000	27	69			20	
		1500	18	45			25	
ТЛ-10	0,5/10Р	50; 100; 150; 200; 400	50	51*	10	15	15	47
		600; 800;	50	128*			17	
		1000	40*	128*			17	
		1500; 2000; 3000	40*	128*	20	30	15; 20; 15	
ТЛМ-10	0,5/10Р	50; 100; 150	50	350	10	15	15	27
		200	50	260				
		300; 400	18,4*	100*				
		600; 800	23*	100*				
		1000; 1500	26*	100*				
ТОЛ-10	0,5/10Р	50	50	350	10	15	10	25

Продолжение табл. 33.3

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	Трехсекундная термическая стойкость или кратность	Электродинамическая стойкость или кратность	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг
					измерительной обмотки	защитной обмотки		
ТОЛ-10	10/10Р	100; 150; 200 300; 400 600; 800 1000; 1500	50 18,4* 23* 36*	52* 100* 100* 100*	10	15	10	25
ТПЛК-10	0,5/10Р 10Р/10Р	10; 15; 30; 60; 100 150; 200; 300; 400 600; 800 1000; 1500	47	250 74,5* 74,5* 74,5*	10	15	12 17 20 20	47
ТПОЛ-20	1/10Р, 10Р/10Р 0,5/10Р, 10Р/10Р	400 600 800; 1000 1500	40	100* 120*	20	15 20 30; 50 50	13 18 24 26	43
ТПОЛ-35	1/10Р 0,5/10Р 10Р/10Р	400 600 800; 1000 1500	40 35	100*	20	15 20 30; 50 50	13 18 24 26	55
ТЛЛ-35	0,1	5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 200; 300; 400; 600; 800; 1000; 1500; 2000; 3000	4	10	15	—	—	86
ТШЛ-0,66	0,5	2000; 3000 4000; 5000	20; 14 12	— —	— 15	— —	— 8	— 9÷14
ТНШЛ-0,66	0,5	800 1000 1500; 2000 3000 4000; 5000 8000; 10 000	25 25 25 75 75 75	20 — 	20	7 10 — 	7 10 11 11 12 2	—
ТНШ-0,66	0,5	300; 400 600; 800; 1000; 1500	— —	— —	5 10	— —	— —	— 2,7
ТШМС-0,66	0,5; 10Р	2000; 3000; 4000 5000; 6000, 8000	25 20	— —	— 40	— 60	— 3	3,9÷9 15
ТНШ-0,66	3	15 000; 25 000	2,5	—	50	—	2	52
ТШЛ-10	0,5/10Р/ 10Р/10Р	2000; 3000; 4000; 5000	35	—	20	30	25	49
ТЛШ-10	0,5/10Р	2000; 3000	42*	81*	20	30	—	26
ТШВ-15	0,2/10Р	6000; 8000	20	—	30	30	15	50÷93
ТШЛО-20	10Р	400	19	200	—	20	15	23
ТШ-20	0,2; 10Р	8000; 10 000; 12 000	160*	—	30	30	9	41÷49
ТШ-24	0,2; 10Р	20 000	—	—	100	100	8	105
ТШВ-24	0,2; 10Р	24 000; 30 000	6	—	100	100	5; 6	106; 115
ТВГ-24	0,5/10Р/ /10Р 10Р/10Р	6000 10 000; 12 000; 15 000	—	—	30	30 40	6 4	—
ТВ-10	0,5	6000	40	—	20	—	3	14
ТВТ-10	0,5	5000; 6000; 12 000	28	—	30	—	10; 12; 24	15; 16; 78

Окончание табл. 33.3

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	Трехсекундная термическая стойкость или кратность	Электродинамическая стойкость или кратность	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность защитной обмотки	Масса, кг
					измерительной обмотки	защитной обмотки		
ТВ-35	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1500; 2000; 3000	8÷200*	—	10÷40	10÷40	2÷30	15÷35
ТВТ-35	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1000; 3000; 4000	28	—	10÷40	15÷40	5÷24	16÷80
ТВ-110	0,5; 1; 10Р	200; 300; 600; 1000; 2000	20÷125*	—	10÷50	10÷60	5÷50	96÷103
ТВТ-110	1; 10Р	300; 600; 1000; 2000	25	—	30÷50	10÷50	12÷24	42÷122
ТВТ-150	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000	25	—	10÷60	10÷40	22	212÷220
ТВ-220	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000; 3000	63÷250*	—	10÷50	10÷50	10÷50	143÷157
ТВТ-220	0,5; 1; 10Р	600; 1000; 2000; 4000	25	—	30÷100	30÷60	24	145÷155
ТВТ-500	1; 10Р	200; 750; 1500; 2000	14÷20	—	20÷100	20÷100	10÷25	108÷217
ТВТ-750	0,5; 1; 10Р	2000; 3000	14	—	20÷100	20÷100	10÷20	100; 117
ТВТ-1150	1; 10Р	4000	15	—	40	40	10	237

* Термическая и электродинамическая стойкости приведены в килоамперах.

** ТТ, исполнение которых обозначено дробью (например, 1/10Р) имеют один трансформатор класса 1 и второй класса 10Р.

Таблица 33.4. Технические данные трансформаторов тока наружной установки

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность при номинальной нагрузке	Трехсекундная термическая стойкость илн кратность	Электродинамическая стойкость или кратность	Масса, кг
			измерительной обмотки	защитной обмотки				
ТФЗМ35А	0,5/10Р	15÷600 800÷1000	50	20	28	30	200 130	250
ТФЗМ35Б-I	0,5/10Р	15÷600 800÷1000 1500÷2000	30	30	20	50 35 35	200 130 70	350
ТФЗМ35Б-II	0,5/10Р/10Р	500÷1000 2000; 3000	— 30	— 50	— 18	49 57*	125* 145*	430
ТФЗМ110Б-II	0,5/10Р/10Р	750/1500**; 1000/2000	20	20	30	34	100	840
ТФЗМ150А, Б-I	0,5/10Р/10Р/10Р	600/1200	40	50	15	23	87	1060
ТФЗМ150Б-II	0,5/10Р/10Р/10Р	1000/2000	30	50	30; 25; 25	41,6	113	1165
ТФЗМ220Б-III	0,5/10Р/10Р/10Р	300/600/1200	30	50; 50; 30	15; 15; 10	39,2	83	2260
ТФЗМ220Б-IV	0,5/10Р/10Р/10Р	500/1000/2000	30	50; 50; 30	25; 25; 20	39,2	50	2380
ТФРМ330Б	0,5/10Р/10Р/10Р/ /10Р	100/2000; 1500/3000	30	40	20	21*	160*	3750
ТФУМ330А	0,5/10Р/10Р/10Р	500/1000/2000	50	50	20; 15; 18	31,6	99	2050
ТФЗМ500Б-I	0,5/10Р/10Р/10Р	500; 1000 2000	— 30	— 75	— 18	39,3 14,6	180 90	4920

Окончание табл. 33.4

Тип трансформатора	Варианты исполнения	Номинальный первичный ток, А	Номинальная вторичная нагрузка, В·А		Номинальная предельная кратность при номинальной нагрузке	Трехсекундная термическая стойкость или кратность	Электродинамическая стойкость или кратность	Масса, кг
			измерительной обмотки	защитной обмотки				
ТФМ500Б	0,5/10Р/10Р/10Р/10Р	1000÷2000 1500÷3000 2000÷4000	30	40	18 15 12	15*	120*	6070
ТФРМ750А	0,5/10Р/10Р/10Р/10Р	1000/2000 1500/3000 2000/4000	30	40	12	15*	120*	8400

*Термическая и электродинамическая стойкости приведены в килоамперах.

**Если номинальный первичный ток указан в виде двух или трех цифр через косую черту (например, 1000/2000), то это означает, что ТТ имеет переключаемый первичный ток 1000 и 2000 А.

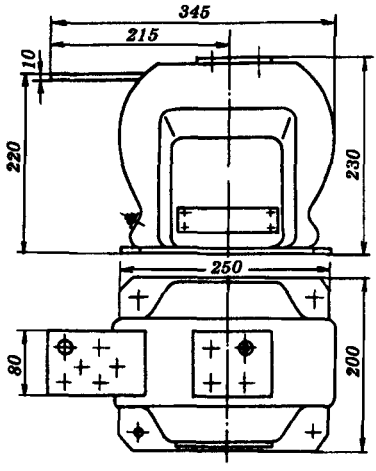


Рис. 33.2. Трансформатор тока ТЛМ-6.

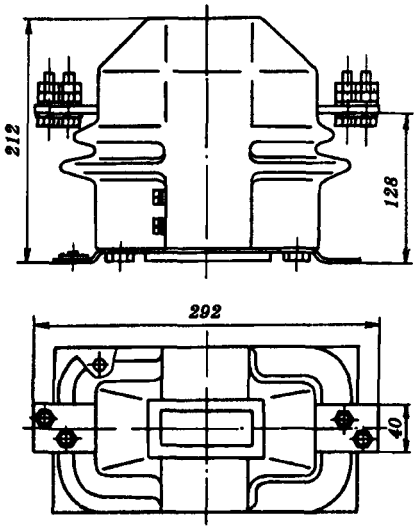
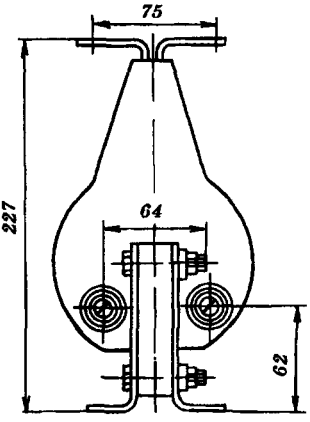


Рис. 33.3. Трансформатор тока ТОЛК-6



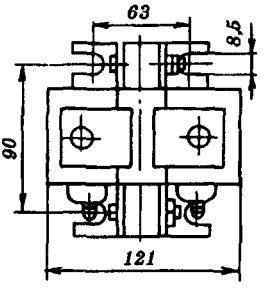


Рис. 33.4. Трансформатор тока ТВЛМ-6

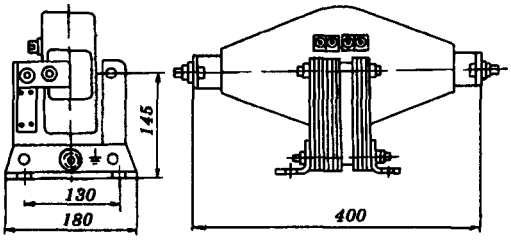


Рис. 33.5. Трансформатор тока ТПЛ-10

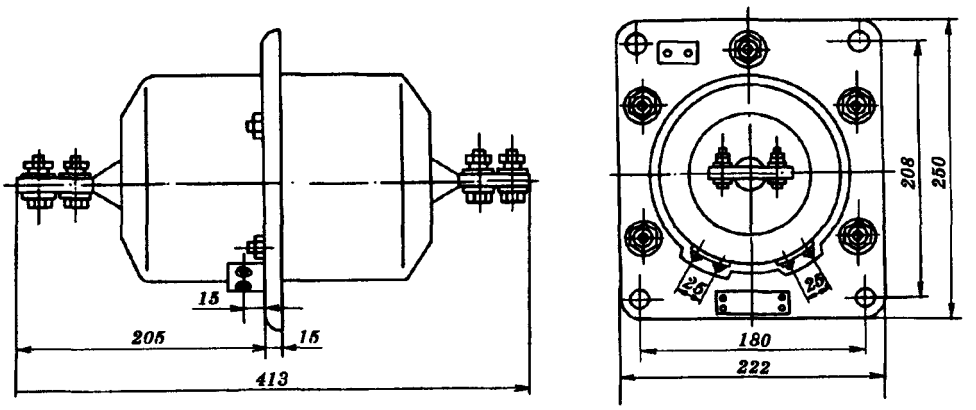


Рис. 33.6. Трансформатор тока ТПОЛ-10

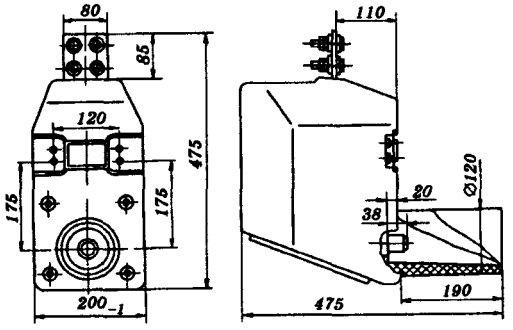


Рис. 33.7. Трансформатор тока ТЛ10 на ток 50÷1500 А

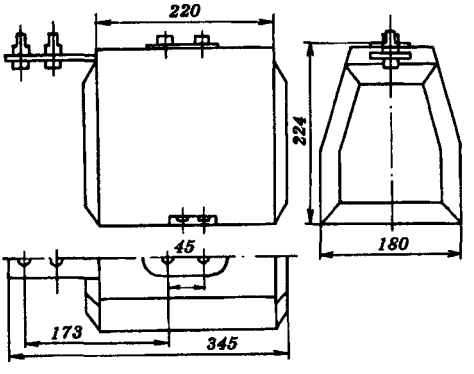


Рис. 33.8. Трансформатор тока ТОЛ-10

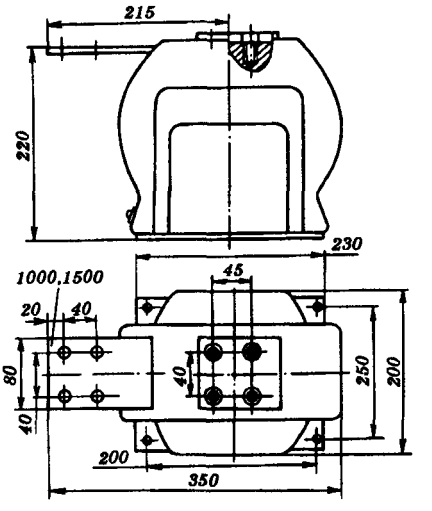


Рис. 33.9. Трансформатор тока ТЛМ-10

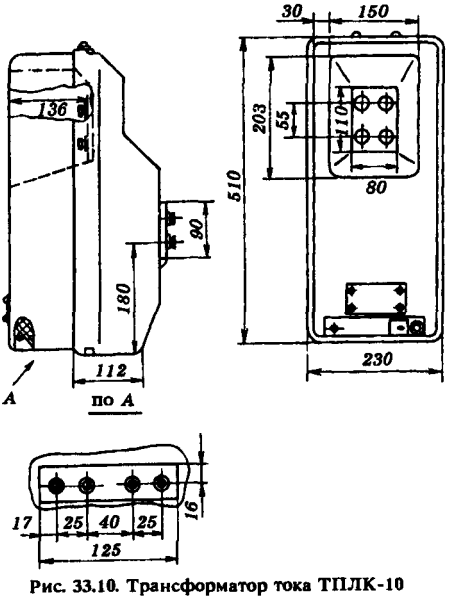


Рис. 33.10. Трансформатор тока ТПЛК-10

Схема соединения элементов такого комплекса приведена на рис. 33.29. Первичный измеряемый постоянный ток протекает через обмотку *АА*. Блок питающих и промежуточных трансформаторов питается от трехфазной системы. Измерительные приборы питаются от выпрямительных мостов.

Буквенное обозначение характеризует конструкцию ТТ, цифра — номинальное напряжение в киловольтах:

ТЛМ-6 — с литой изоляцией, малогабаритный, напряжение 6 кВ.

ТОЛК-6 — опорной конструкции, катушечный, с литой изоляцией, напряжение 6 кВ.

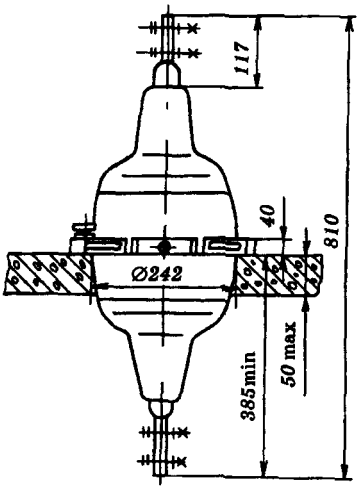


Рис. 33.11. Трансформатор тока ТПОЛ-20

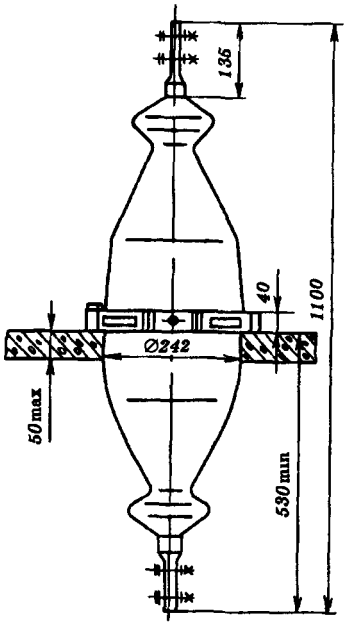


Рис. 33.12. Трансформатор тока ТПОЛ-35

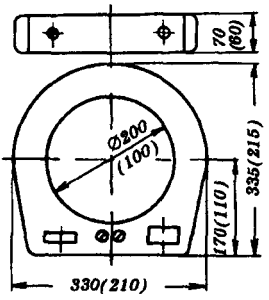


Рис. 33.13. Трансформатор тока ТНШЛ-0,66 на токи 3000÷5000 А (в скобках размеры при токах 800÷2000 А)

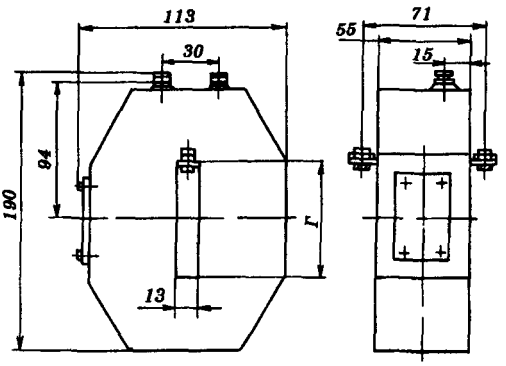


Рис. 33.14. Трансформатор тока ТШН-0,66 на токи 800÷1500 А

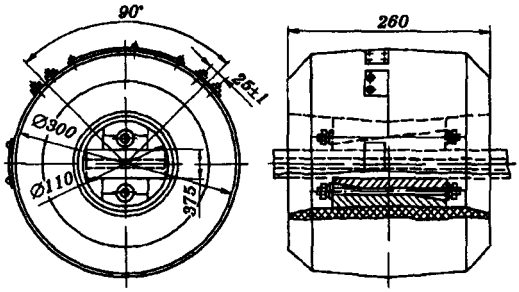


Рис. 33.15. Трансформатор тока ТШЛ-10

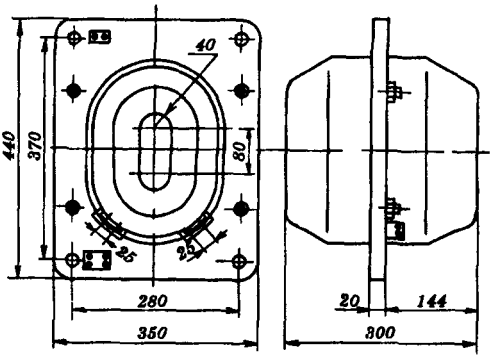


Рис. 33.16. Трансформатор тока ТПШЛ-10

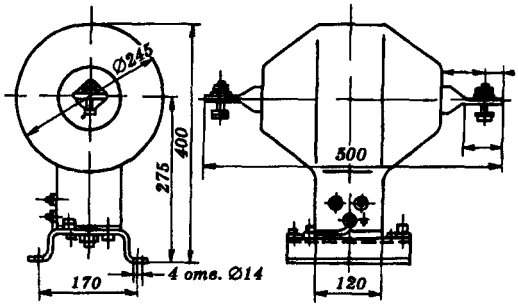


Рис. 33.17. Трансформатор тока ТШЛО-20

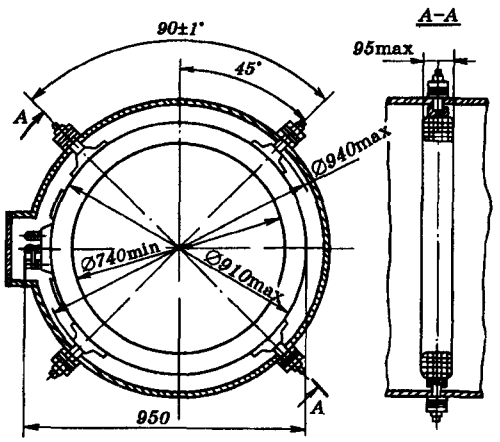


Рис. 33.18. Трансформатор тока ТШ-20

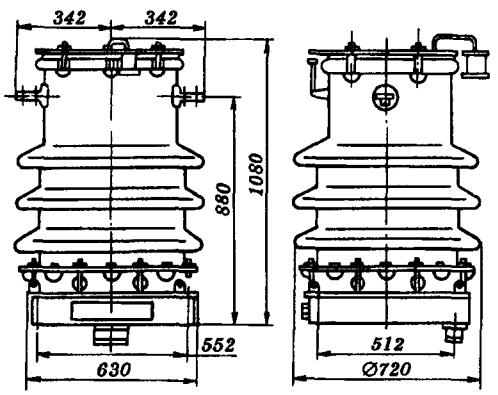


Рис. 33.19. Трансформатор тока ТФЗМ35Б

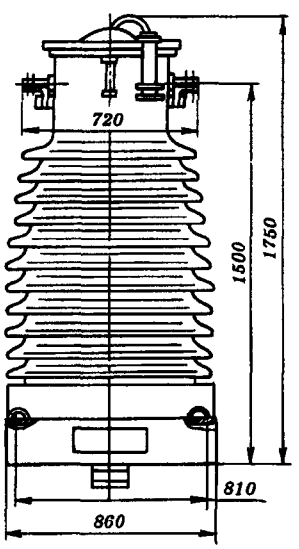


Рис. 33.20. Трансформатор тока ТФЗМ110Б

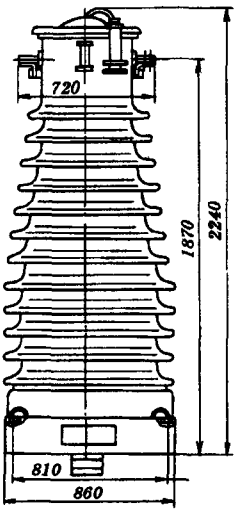


Рис. 33.21. Трансформатор тока ТФЗМ150Б

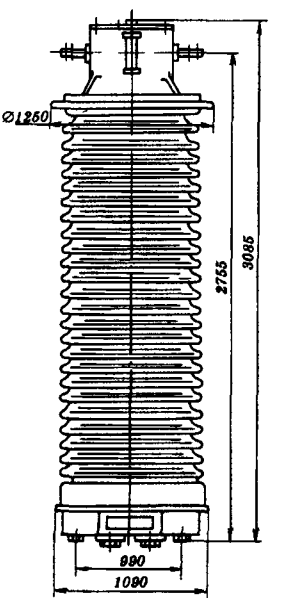


Рис. 33.22. Трансформатор тока ТФЗМ-220Б-III

ТВЛМ-6 — встроенный, катушечный, с литой изоляцией, малогабаритный, напряжение 6 кВ.

ТПЛ-10 — проходного типа, с литой изоляцией, напряжение 10 кВ.

ТПЛУ-10 — проходного типа, с литой изоляцией, усиленный по термической и динамической стойкости, напряжение 10 кВ.

ТПОЛ-10 — проходного типа, одновитковый, с литой изоляцией, напряжение 10 кВ.

ТПОЛ-20 — проходного типа, одновитковый, с литой изоляцией, напряжение 20 кВ.

ТПОЛ-35 — проходного типа, одновитковый, с литой изоляцией, напряжение 35 кВ.

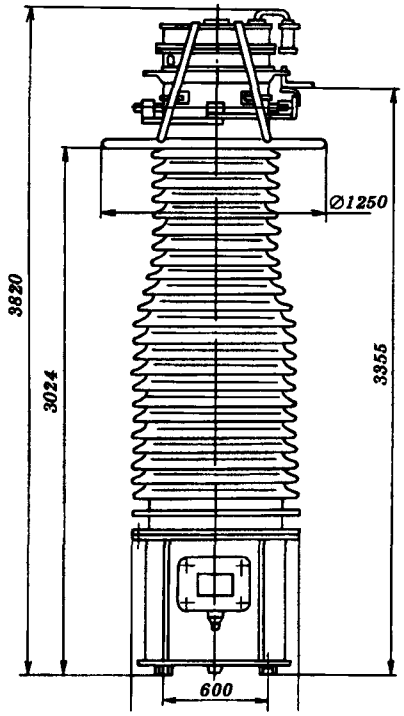


Рис. 33.23. Трансформатор тока ТФУМ-330А

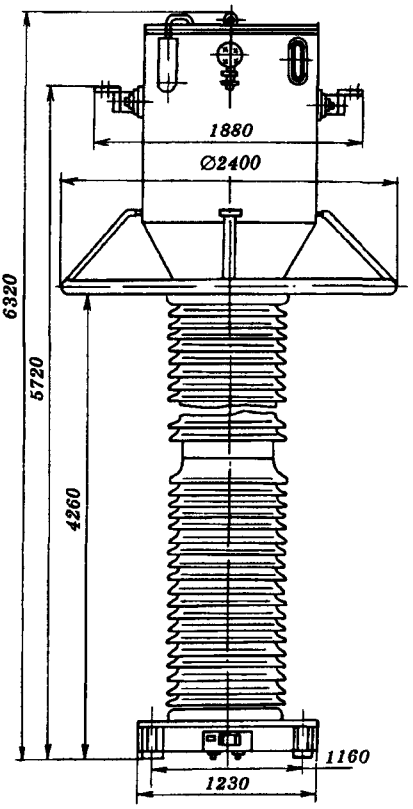


Рис. 33.25. Трансформатор тока ТФРМ500Б

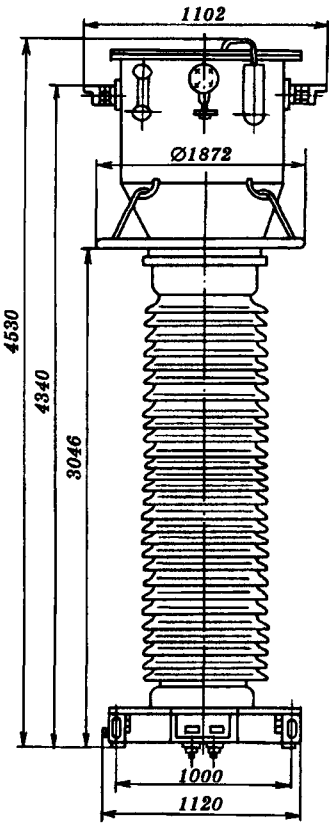


Рис. 33.24. Трансформатор тока ТФРМ-330Б

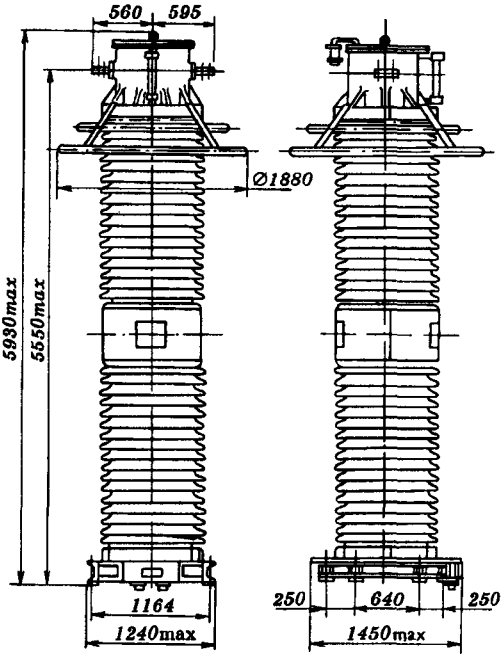


Рис. 33.26. Трансформатор тока ТФЗМ500Б

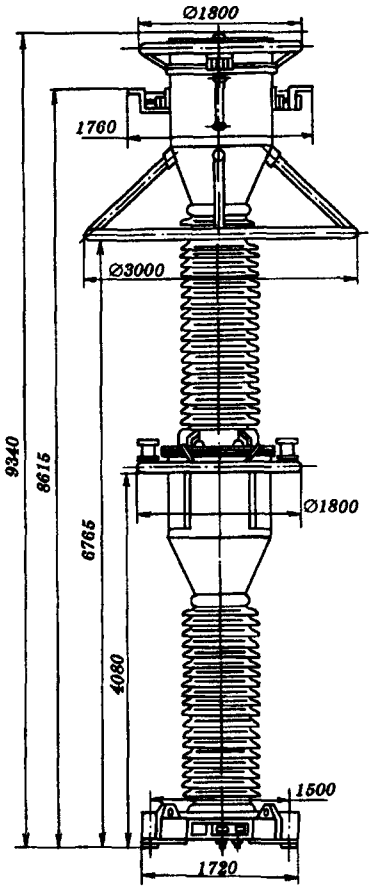


Рис. 33.27. Трансформатор тока ТФРМ750А

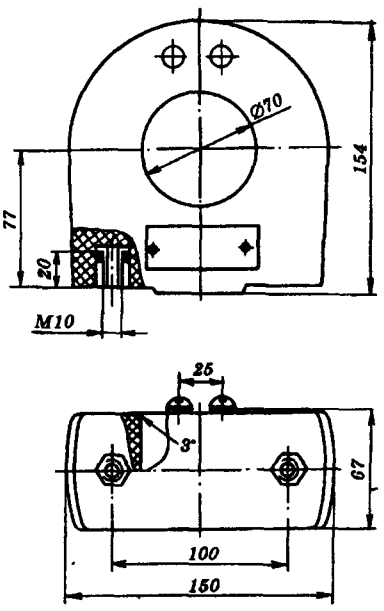


Рис. 33.28. Трансформатор тока ТФЗЛМ

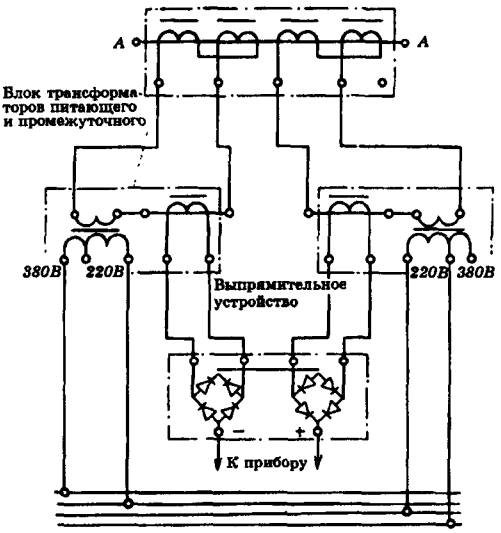


Рис. 33.29. Схема соединения элементов трансформатора постоянного тока на напряжение 35 кВ ($I_{ном} \leq 4000$ А)

ТЛ-10 — для комплектных распредустройств. Один вывод первичной обмотки — шина, второй имеет форму штыря, в который входит розетка выкатной части КРУ. Изоляция литая, напряжение 10 кВ.

ТЛЛ-35 — для лабораторных измерений повышенной точности, с литой изоляцией, напряжение 35 кВ.

ТОЛ-10 — опорного типа, с литой изоляцией, напряжение 10 кВ.

ТПЛК-10, ТЛК-10, ТШЛК-10 — для КРУ с литой изоляцией, напряженне 10 кВ.

ТШЛ-0,66 — шинный, с литой изоляцией, напряжение 0,66 кВ.

ТШВ-15, ТШВ-24, ТШ-20 — для пофазно экранированных токопроводов, напряжение 15, 24 и 20 кВ.

ТВГ-24 — для установки на нулевых выводах турбогенераторов, напряжение 24 кВ.

ТВ-10 — встроенные в выключатели, напряжение 10 кВ.

ТВТ-10 — встроенные в силовые трансформаторы, напряжение 10 кВ.

ТФЗМ-35 — в фарфоровом кожухе, заполненный трансформаторным маслом, со звеньевой первичной обмоткой, напряжение 35 кВ.

ТФРМ-330 — в фарфоровом кожухе, заполненном трансформаторным маслом, с рымовидной первичной обмоткой, напряжение 330 кВ.

ТФУМ-330 — в фарфоровом кожухе, заполненном трансформаторным маслом с U-образной первичной обмоткой, напряжение 330 кВ.

33.3. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ (ТН)

НАЗНАЧЕНИЕ

Трансформатор напряжения служит для преобразования высокого напряжения в низкое стандартного значения (100 или $10\sqrt{3}$, В), удобное для измерения. ТН позволяет также изолировать измерительные цепи и цепи релейной защиты от цепей высокого напряжения. Первичная обмотка ТН изолируется от вторичной соответственно классу напряжения. Для безопасности обслужнвания приборов один конец вторичной обмотки заземляется.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$U_{1ном}$, $U_{2ном}$ — номинальные первичное и вторичное напряжение, В, действующее значение;

ΔU — погрешность по напряжению, %;

δ — угловая погрешность, мин;

U_1 — Пераичное напряжение;

I_0 — намагничнвающий ток, А;

I_1 — первичный ток, А;

I'_2 — вторичный ток, приведенный к первичной обмотке, А;

$r_{1т}$ и $r'_{2т}$ — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток, Ом, для Т-образной схемы замещения. Сопротивление $r'_{2т}$ приведено к первичной обмотке;

$x_{1т}$ и $x'_{2т}$ — реактивные сопротивленя обмоток трансформатора в Т-образной схеме замещения, Ом;

U'_2 — вторичное напряженне, приведенное к первичной обмотке, В;

φ_2 — угол сдвига между $\underline{U}'_2$ и $\underline{I}'_2$;

$\varphi_к$ — угол сдвига фаз, определяемый активным и реактивным сопротнвлением обмоток;

ψ — угол потерь;

$x_{к.з}$ — сопротивление короткого замыкания, Ом;

φ_0 — угол между намагнничивающим током $\underline{I}_0$, и вторичным приведенным напряженнем $\underline{U}'_2$;

Φ — поток в магнитопроводе трансформатора, Тл;

U'_2 — вторичное напряженне, приведенное к первичной обмотке, В.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Номинальный коэффицнент трансформацни — отношение номинального первнчного напряженния к номинальному вторичному:

$$k_{ном} = U_{1ном}/U_{2ном}.$$

Погрешность по напряжению, %:

$$\Delta U = \frac{U_2 k_{ном} - U_1}{U_1}.$$

Векторная диаграмма ТН приведена на рнс. 33.30, *а*. Погрешность по напряжению, %

$$\Delta U = -\frac{AF}{OF}.$$

По ГОСТ 1983-77 направления токов и напряжений, показанные на рис. 33.30, *б*, прнняты за положительные.

При отсутствии угловой погрешности векторы $\underline{U}_1$ и $\underline{U}'_2$ совпадают по фазе. Если вектор U'_2 опережает вектор $\underline{U}_1$, угловая погрешность счнтается положительной.

Допустимая погрешность ТН по напряжению в процентах при номинальных условиях числено равна классу точности.

ТН включаются так же, как силовые трансформаторы.

Вторнчная мощность определяется уравнением:

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2^2/Z_2.$$

Ток вторичной обмоткн

$$I_2 = U_2/Z_2.$$

Номннальная мощность ТН представляет собой наибольшее значение вторичной мощностн при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, при которой погрешность ТН не выходит за пределы, определенные классом точности (ГОСТ 1983-77).

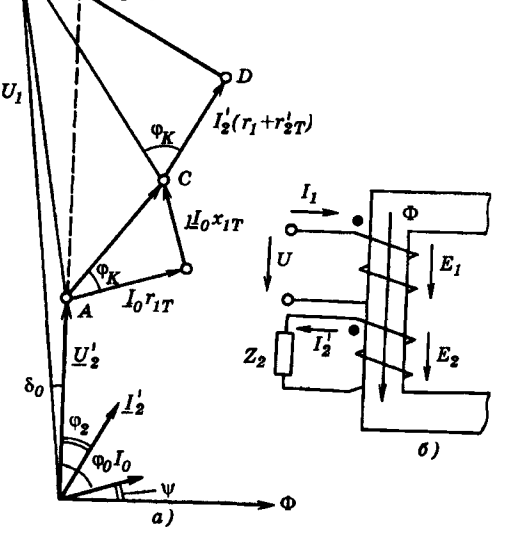


Рис. 33.30. Векторная диаграмма трансформатора напряжения (*а*) и условное положительное направление электрических велнчин (*б*)

Таблица 33.5. Погрешности трансформаторов напряжения

Класс точности	Максимальная погрешность (±)	
	напряжения, %	угловая, мин
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	Не нормирована

Примечание. Для трехобмоточных трансформаторов классы точности устанавливаются для основной вторичной обмотки.

Трансформаторы напряжения должны удовлетворять ГОСТ 1983-77. Классы точности и нормированные погрешности приведены в табл. 33.5. Указанные погрешности должны соблюдаться при колебании первичного напряжения в пределах $(0{,}8+\dots+1{,}2)U_{1\text{ном}}$, коэффициенте мощности активно-индуктивной нагрузки, равном 0,8, и изменении отдаваемой мощности от $0{,}25S_{\text{ном}}\times(U_1/U_{1\text{ном}})^2$ до $S_{\text{ном}}(U_1/U_{1\text{ном}})^2$, где $S_{\text{ном}}$ — номинальное значение мощности, В·А; $U_{1\text{ном}}$ — номинальное значение первичного напряжения, В; U_1 — значение напряжения, подведенного к ТН.

При использовании в трехфазной системе двух ТН (рис. 33.31) не рекомендуется присоединять нагрузку между точками *a* и *c*, так как через трансформаторы будет протекать дополнительный ток нагрузки, вызывающий повышение погрешности.

На рис. 33.32 приведена схема включения трех однофазных ТН по схеме звезда—звезда с заземленной нейтралью. Схема включения трехфазного трехстержневого трансформатора с заземлением

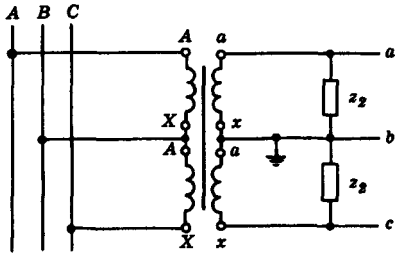


Рис. 33.31. Присоединение нагрузки двух ТН в трехфазной цепи

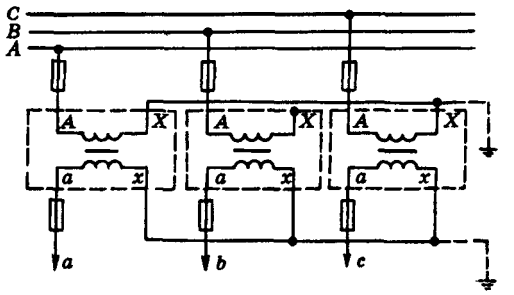


Рис. 33.32. Схема включения трех однофазных ТН с заземленной нейтралью

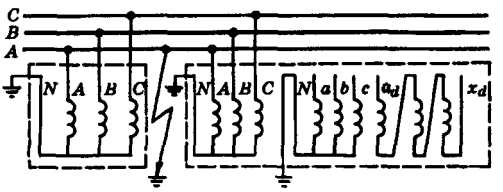


Рис. 33.33. Схема включения трехфазного трехстержневого ТН в системе с заземленной нейтральной точкой

нейтрали *N* показана на рис. 33.33, обмотка $a_d x_d$ — три фазы, соединенные в открытый треугольник.

При измерении мощности или энергии трехфазной системы применяется схема включения ТН, приведенная на рис. 33.34. Для измерения напряжения и контроля изоляции используется схема включения трех однофазных ТН, изображенная на рис. 33.35. При использовании трехстержневого ТН в схемах с изолированной нейтралью при заземлении одной из фаз возникает аварийный режим (рис. 33.36, *а*). Фаза *0A* закорачивается, а потоки фаз *0B* и *0C* пронизывают контур обмотки *0A*. Для того чтобы этого избежать, у магнитопровода имеется пять стержней (см. рис. 33.36, *г*). Через боковые стержни замыкаются потоки от первичных обмоток *0B* и *0C*. При отсутствии заземления напряжение на обмотке $a_d x_d$ равно нулю. Векторные ди-

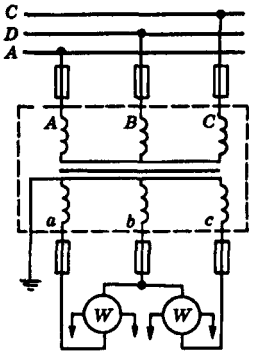


Рис. 33.34. Схема включения трехфазного трехстержневого ТН для измерения мощности по методу двух ваттметров

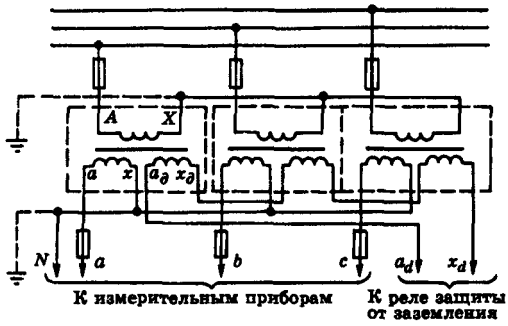


Рис. 33.35. Схема включения трех однофазных ТН для контроля изоляции

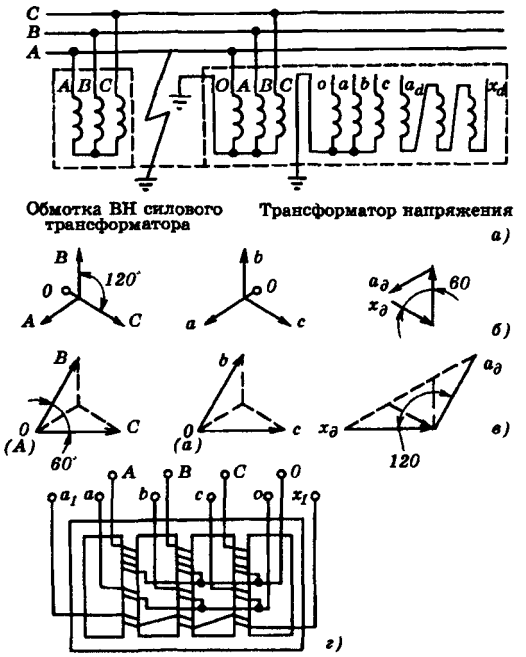


Рис. 33.36. Схема включения трехстержневого трехфазного ТН и ТН с пятистержневым сердечником (для контроля изоляции в системе с изолированной нейтралью)

аграммы первичных и вторичных напряжений для нормального режима и прн заземлении фазы *А* показаны на рнс. 33.36, *б* и *в*.

33.4. ВЫБОР ТН

Трансформатор напряжения служит для преобразования измеряемого первичного напряжения U_1 во вторичное напряжение U_2, значение которого удобно для измерення (100 или $100/\sqrt{3}$, В). В установках высокого напряжения ($U_{ном}$>1000 В) ТН изолнрует цепь измерительных н защитных устройств от цепн высокого напряження. Схема включения однофазного ТН представлена на рнс. 33.37. Предохранители FU_1 и FU_2 защищают сеть высокого напряжения от повреждений первичной обмотки ТН. Предохранители FU_3 и FU_4 (или автоматы) защищают ТН от повреждений в нагрузке *V*.

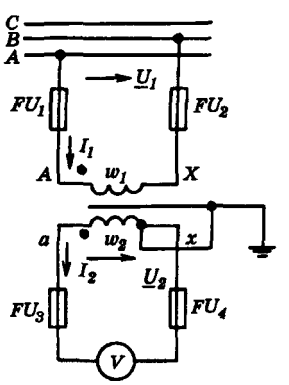


Рис. 33.37. Схема включения однофазного ТН

Для ТН:

1. Номинальное напряжение первичной обмотки ТН должно быть равно номинальному напряжению установки $U_{ном.ТН} = U_{ном.уст}$ (для систем с изолнрованной нейтралью). Для систем с заземленной нейтралью номнальное напряжение первичной обмоткн должно быть равно фазовому напряжению установки.

2. Для измерения мощности, электроэнергин рекомендуется схема рис. 33.31 или схема рис. 33.34.

3. Для питания счетчнков электроэнергин нспользуются ТН класса 0,5. Для щитовых приборов нспользуются ТН классов 1,0 и 3,0. Требования к ТН со стороны низкого напряжения диктуются релейной защитой и мощностью потребляемой измернтельнымн приборами.

4. Нагрузка должна равномерно распределяться по всем трем фазам. Суммарная нагрузка не должна превышать значенне, указанное в каталоге при требуемом классе точности.

5. Сечение проводников, соединяющих ТН и приборы, выбирается такнм, чтобы паденне напряжения на них не превышало 0,5% $U_{2ном}$, где $U_{2ном}$ — номинальное напряжение вторичной обмотки. Для обеспечения механической прочности сечение медного кабеля должно быть не менее 1,5 мм^2, алюминиевого — 2,5 мм^2. Медный кабель нспользуется в установках с номинальным напряжением $U_{ном} \geq 220$ кВ.

6. Для защиты ТН от повреждений в цепи нагрузки во вторичную цепь включается автоматнческий выключатель или предохранитель. Номинальный ток защитных аппаратов равен току нагрузки.

Для защиты сетн от повреждеиннй в первичной обмотке ТН устанавлнваются кварцевые предохранители типа ПКН. Номинальное напряженне предохранителя выбирается равным номинальному напряженню трансформатора.

7. ТН можно нспользовать как силовой трансформатор. Предельная мощность указана в каталожных данных. При предельной мощностн температура трансформатора достигает предельного значения.

Технические данные ТН приведены в табл. 33.6. Внешнний вид ТН представлен на рис. 33.38—33.49.

Типовое обозначение ТН:

НТМИ — трехфазный, с естественным масляным охлажденнем, с обмоткой для контроля изоляцнн сетн.

НОЛ — однофазный, с литой изоляцией. Оба вывода первичной обмотки изолированы.

ЗНОЛ — однофазный, с лнтой нзоляцией. Один вывод первичной обмотки нзолирован, второй заземлен.

НОМ — однофазный, с естественным масляным охлажденнем. Оба вывода первичной обмоткн изолированы.

ЗНОГ — однофазный, с газовой изоляцией. Однн вывод первичной обмоткн заземлен, второй нзолирован.

НКФ — каскадный, залитый трансформаторным маслом, в фарфоровой покрышке.

НДЕ — емкостный делитель напряженння с последующнм пониженнем напряженння электромагнитным трансформатором ТН.

Таблица 33.6. Технические данные ТН

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, В		Номинальная мощность, В·А, для классов точности			Предельная мощность, В·А	Масса, кг
	высокое (ВН)	низкое (НН)	0,5	1	3		
НТМИ-6-66	3000 6000	1000; 100/3*	50 75	75 150	200 300	400 630	59
НОЛ.08-6	6000; 6300; 6600	100	50	75	200	400	28
НОЛ.11-6	6000	100; 127	—	—	250	500	16
ЗНОЛ.09-6	3000/√3; 3300/√3; 6000/√3	100/√3; 100/3; 100*	30	50	150	250	28,5
	6300/√3; 6600/√3; 6900/√3		50	75	200	400	
ЗНОЛ.06-6	3000/√3; 3300/√3	100/√3; 100/3; 100*	30	50	150	250	26,5
	6000/√3; 6300/√3; 6600/√3; 6900/√3		50	75	200	400	
НТМИ-10-66	10 000	100; 100/3*	120	200	500	100	81
НОМ-10-66	10 000	100	75	150	300	630	—
НОЛ.08-10	6900; 10 000; 11 000	100÷110					31,5
ЗНОЛ.09-10	10 000/√3; 11 000/√3	100/√3; 100/3; 100*					31,5 31,5
ЗНОЛ.06-10	10 000/√3; 11 000/√3	100/√3; 100/3; 100*					— —
ЗНОЛ.06-15	13 800/√3; 15 750/√3	100/√3; 100/3; 100*					28,5 29,5
ЗНОЛ.06-20	18 000/√3; 20 000/√3	100/√3; 100/3; 100*					— — 32,5
ЗНОЛ.06-24	24 000/√3	100/√3; 100/3; 100*					— 40,5
ЗНОГ-110-79	100 000/√3	100/√3; 100*	400	600	120	2500	250
ЗНОГ-220-79	220 000/√3	100/√3; 100					390
НКФ-110-57	110 000/√3	100/√3; 100*	400	600	1200	2000	770
НКФ-110-58		100/√3; 100					
НКФ-220-58	220 000/√3	100/√3; 100; 110/√3; 100*	400	600	1200	2000	1560
	230 000/√3	110/√3; 100*; 110/√3; 100*					
НКФ-330-73	330 000/√3	110/√3; 100*					1980
НКФ-400-65	400 000/√3	100/√3; 100*	—	500	1000	2000	4830
НКФ-500-78	500 000/√3	100/√3; 100*					
НДЕ-500-72	500 000/√3	100/√3; 100*	300	500	1000	1200	3950
НДЕ-750-72	750 000/√3	100/√3; 100*					4600
НДЕ-1150-78	1 150 000/√3	100/√3; 100*	—	300	600	—	15 535

* Вторичное напряжение на дополнительной обмотке.

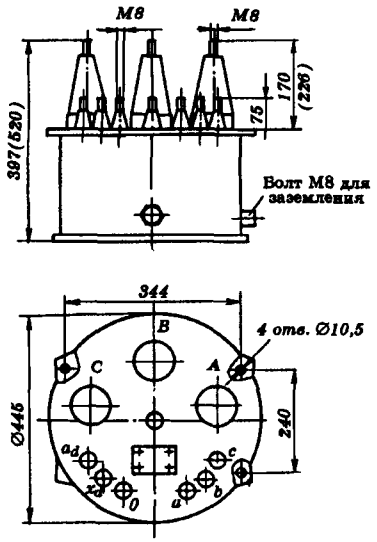


Рис. 33.38. Трансформатор напряжения НТМИ-6-66 (в скобках размеры для ТН НТМИ-10-66)

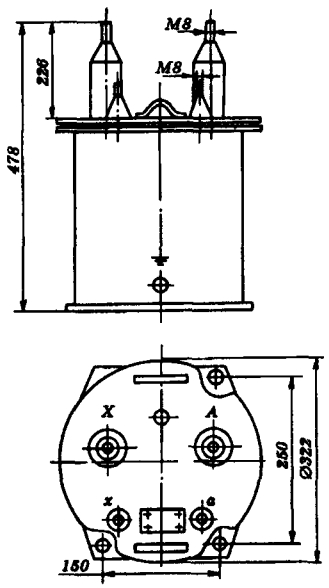


Рис. 33.39. Трансформатор напряжения НОМ-10-66

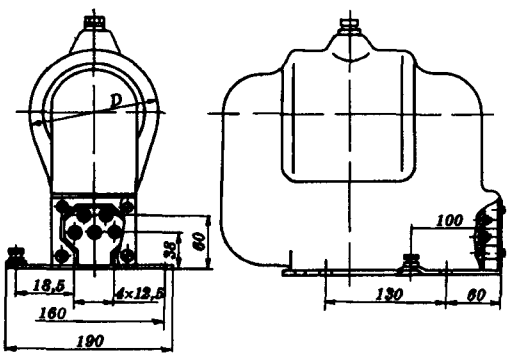


Рис. 33.40. Трансформатор напряжения ЗНОЛ.06

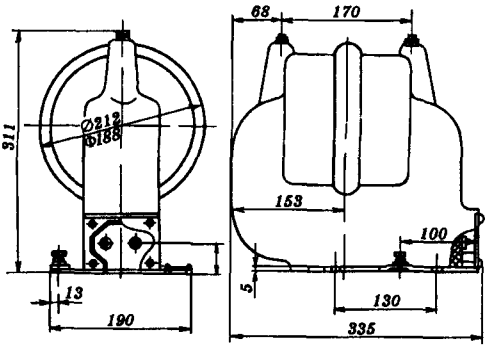


Рис. 33.41. Трансформатор напряжения НОЛ.08.10 (в скобках размер для трансформатора НОЛ.08.6)

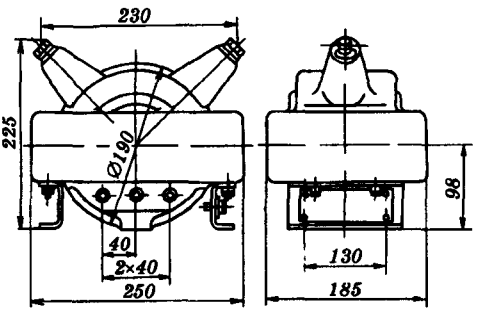


Рис. 33.42. Трансформатор напряжения НОЛ.11-6

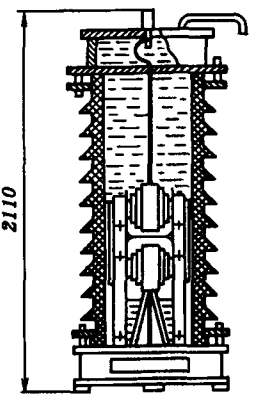


Рис. 33.43. Трансформатор напряжения НКФ-110-58

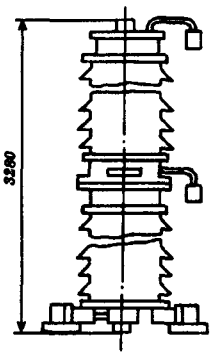


Рис. 33.44. Трансформатор напряжения НКФ-220-58

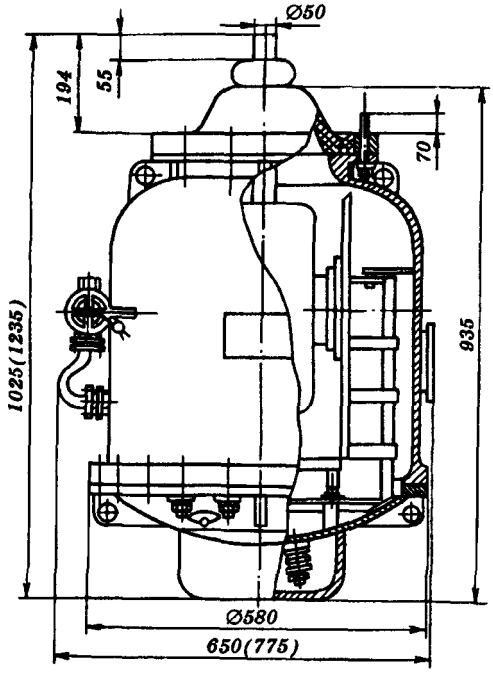


Рис. 33.45. Трансформатор напряжения ЗНОГ-110-79 (в скобках размеры для трансформатора ЗНОГ-220-79)

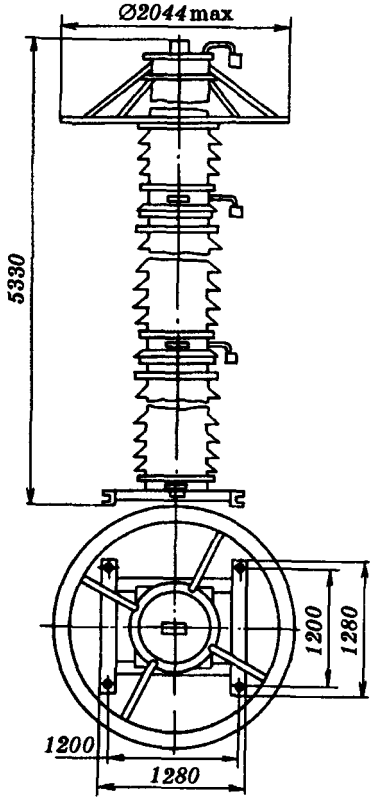


Рис. 33.46. Трансформатор напряжения НКФ-330-79

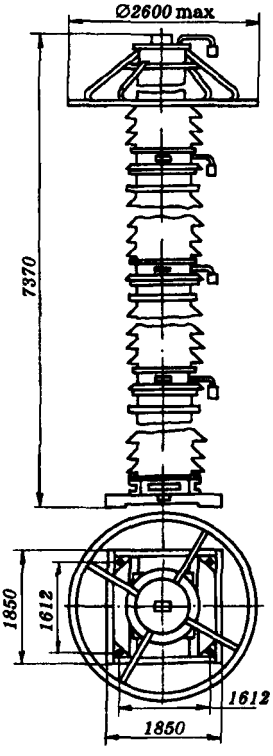


Рис. 33.47. Трансформатор напряжения НКФ-500-78

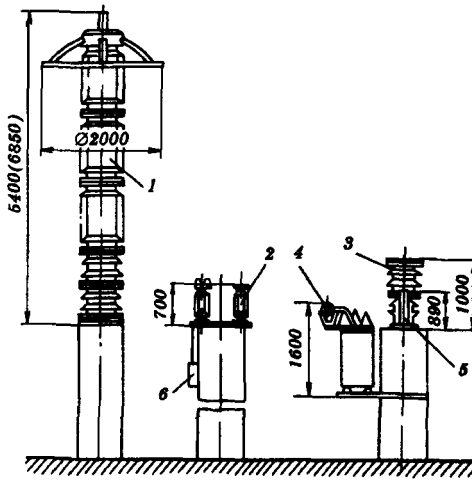


Рис. 33.48. Трансформатор напряжения НДЕ-500-72

1 — делитель напряжения; 2 — однополюсный разъединитель; 3 — электромагнитное устройство; 4 — заградитель высокочастотный; 5 — разрядник вентильный; 6 — привод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

33.1. **ГОСТ 7746-78.** Трансформаторы тока. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1978.

33.2. **Казанский В.Е.** Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. М.: Энергия, 1978.

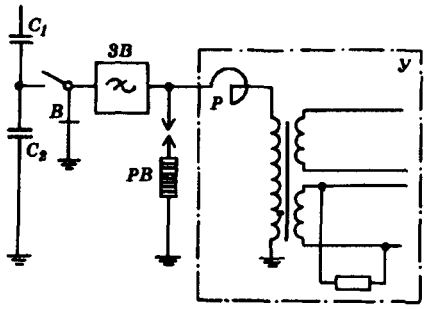


Рис. 33.49. Принципиальная электрическая схема конденсаторного трансформатора напряжения НДЕ

C_1 — конденсатор связи; *C_2* — конденсатор отбора мощности; *В* — однополюсный разъединитель; *ЗВ* — заградитель высокочастотный; *РВ* — разрядник вентильный ; *Р* — реактор; *У* — устройство для гашения феррорезонансных колебаний (демпфер)

33.3. **Казанский В.Е.** Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М.: Энергия, 1969.

33.4. **Афанасьев В.В.** Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1980.

33.5. **Дымков А.М., Кибель В.М., Тишенин Ю.В.** Трансформаторы напряжения. М.: Энергия, 1975.

33.6. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984.

33.7. **Чунихин А.А.** Электрические аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1988.

33.8. **Основы** теорин электрических аппаратов / Под ред. И.С.Таева. М.: Высшая школа, 1987.

33.9. **ГОСТ 1983-77.** Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1977.

33.10. **ГОСТ 18685-73.** Трансформаторы тока н напряжения. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1977.

33.11. **Чунихин А.А., Жаворонков М.А.** Аппараты высокого напряження. М.: Энергоатомиздат, 1985.

33.12. **Электротехнический** справочнпк / Под ред. проф. МЭИ. Изд. 7-е. Т. 2. М.: Энергоатомнздат, 1986.

Раздел 34

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

34.1. Термины и определения 339
34.2. Электромагниты управления и электроуправляемые муфты 339
Электромагниты постоянного тока (340). Электромагниты переменного тока (342). Электромагниты с питанием от источников постоянного и переменного токов (344). Электроуправляемые муфты (349).
34.3. Контакторы и пускатели 351
Примерный порядок расчета контактора и пускателя (352). Контакторы постоянного тока (354). Контакторы переменного тока (354). Пускатели переменного тока (355).
34.4. Автоматические выключатели и предохранители 359
Некоторые разновидности автоматических выключателей (359). Плавкие предохранители (363).
34.5. Командоаппараты, рубильники, переключатели 365
34.6. Силовые полупроводниковые аппараты управления 368
Тиристорные прерыватели переменного тока (369). Силовые полупроводниковые прерыватели постоянного тока (372).
34.7. Гибридные аппараты 373
Список литературы 376

34.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Номинальный ток $I_{ном}$ — наибольшее значение тока (действующее), который аппарат способен длительно пропускать при заданном номинальном напряжении, номинальной частоте и номинальной температуре окружающей среды при условии, что температура нагрева частей аппарата не должна превышать допустимую температуру для длительного режима работы. Номинальные токи устанавливаются по пятому нормальному ряду чисел с коэффициентом нарастания $\sqrt[5]{10}$, т.е. 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160 А и т.д.

Номинальное напряжение $U_{ном}$ рекомендуется:
для переменного тока: 36, 127, 220, 380, 660 В;
для постоянного тока: 24, 48, 110, 220, 440, 750 В.

Время дуги $t_д$ — время от момента возникновения дуги на контактах до ее полного погасания.

Режимы работы: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный. При продолжительном режиме аппарат работает в течение времени, достаточного для достижения всеми его частями установившейся температуры. При кратковременном режиме температура частей аппарата не успевает достигнуть установившегося значения.

Термическая стойкость аппарата и его частей определяется действующим значением тока термической стойкости, протекание которого в течение времени термической стойкости (1,5 или 10 с) не вызовет нагрева токоведущих частей выше допустимого.

Электродинамическая стойкость аппарата — способность аппарата пропускать во включенном положении наибольший ток без самопроизвольного отключения и без механического или электрического разрушения.

Предельный ток отключения — наибольшее амплитудное значение тока в цепи, который способен отключить аппарат и успешно погасить дугу [34.5—34.8].

Электромагниты, выпускаемые отечественной промышленностью, работают в климатических условиях:
с умеренным климатом (У);
с умеренным и холодным климатом (УХЛ);
с сухим и влажным тропическим климатом (Т);
для всех районов с нормальным климатом (О).

Электромагниты различаются по категориям размещения:
в закрытых помещениях с естественной вентиляцией (категория 3);
в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (категория 4);
в помещениях с повышенной влажностью (категория 5).

34.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЕ МУФТЫ

Электромагниты являются дистанционно управляемыми электрическими аппаратами и предназначены для привода электрических, механических, пневматических и гидравлических устройств, применяемых в металлорежущих станках, роботах, следящих системах автоматики и телемеханики, гибких автоматизированных модулях технологического оборудования и т.п. Отечественной промышленностью выпускаются электромагниты постоянного тока (рис. 34.1, 34.2), переменного тока (рис. 34.3) и электромагниты с питанием от источников постоянного и переменного тока.

По направленности перемещения якоря конструкции электромагнитов различают [34.9]:

одностороннего действия, когда якорь перемещается из начального положения в конечное под воздействием внутренних (электромагнитных) сил, а возвращается под действием внешних усилий (рис. 34.1, 34.2);

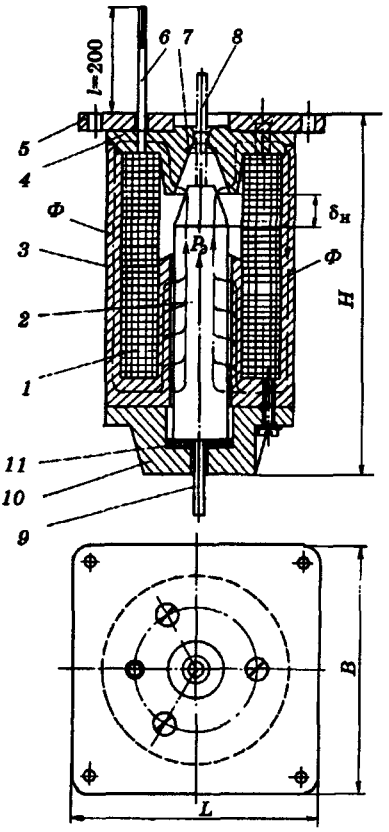


Рис. 34.1. Электромагнит управления постоянного тока одностороннего действия

1 — обмотка; *2* — якорь; *3* — корпус; *4, 5* — фланцы; *6* — выводные провода; *7* — немагнитная прокладка; *8, 9* — приводные штоки; *10* — крышка; *11* — эластичная прокладка; $\delta_н$ — начальный рабочий воздушный зазор магнитной системы; Ф — магнитный поток в магнитной системе; $P_э$ — тяговое электромагнитное усилие

двустороннего действия с нулевым положением, когда движение якоря в зависимости от схемы возбуждения происходит в одном из двух противоположных направлений относительно нулевого положения, а возврат в нулевое положение — под действием внешних усилий (рис. 34.3);

реверсивного действия, когда движенне якоря в зависимости от схемы возбуждения происходит нз одного конечного положения в другое, исключая нулевое положение из-за отсутствня в конструкцни электромагнита возвратных пружнн.

Номинальное напряжение $U_{ном}$ электромагнитов управления:

постоянного тока: 12, 24, 28, 60, 110, 220, 440 В;

переменного тока: для однофазных электромагнитов — 24, 36, 42, 60, 110, 220 и 380 В; для трехфазных электромагнитов — 220, 380, 660 В.

Электромагниты должны работать при напряжениях от $0{,}9U_{ном}$ до $1{,}1U_{ном}$. Некоторые типы электромагнитов допускают измененне напряжения в пределах $0{,}85 \div 1{,}05U_{ном}$.

Электромагниты переменного тока рассчитаны для работы при частоте напряжения питания 50 или 60 Гц.

Средний уровень шума однофазных электромагнитов переменного тока в конечном положении якоря и при приложении к нему противодействующего усилия, не превышающего номнналыное тяговое усилне, составляет не более 60 дБ на расстоянии 1 м.

Номинальное тяговое усилие электромагнита это минимально гарантированное значение тягового усилия прн номинальном ходе и минимальном значении питающего напряжения.

Условия эксплуатации [34.9]:

интервал температур окружающей среды от 45 до +50 °С;

влажность от 80 до 100 %.

Предназначены для работы в наземных условиях и на высоте до 2000 м (некоторые типы электромагнитов допускаются для работы на высоте до 4300 м).

Окружающая среда должна быть невзрывоопасной, не содержать газы, жидкость н пыль в концентрациях, нарушающих нормальную работу электромагнита (разрушающих металл и изоляцию).

Не допускается непосредственное воздействие солнечной радиации, так как она разрушает лакокрасочное покрытие электромагнита и вызывает ускоренное старение изоляции.

Электромагниты управления относятся к изделиям неремонтируемым.

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА [34.10]

Технические параметры электромагнитов постоянного тока представлены в табл. 34.1 и 34.2, а условия эксплуатации — в табл. 34.3.

Электромагниты серии ЭУ (ТУ16-529.075-80). Предназначены для дистанционного управлення гидравлическими, пневматическими н другими нсполнительными механизмами.

Серия состоит из восьми типов. Номнналыные напряжения 12, 24 и 48 В постоянного тока; допускается электропитание от источнпка двухполупериодного выпрямленного переменного тока.

Вибростойкость электромагнитов серии ЭУ от 1 до 60 Гц прн максимальном ускорении 80 м/с^2 н длительностн от 2 до 15 мс.

Электромагниты типа ЭМ25 (ТУ16-729.303-81). Предназначены для дистанционного управления гидравлнческимн распределителями. Серия имеет один тип на номинальные напряженпя 12, 24, 48, 110 В постоянного тока.

Электромагниты типа ЭМ28-6 (ТУ16-729.353-82). Предназначены для дистанцнонного управления исполнительными механизмами промышленного назначения в продолжнтельном режиме работы и для дистанцнонного управления гидравлнческнми распределителями комплектных распредустройств с элегазовой изоляцией в импульсном режиме работы. Серия нмеет один тнп на номинальные напряжения постоянного тока:

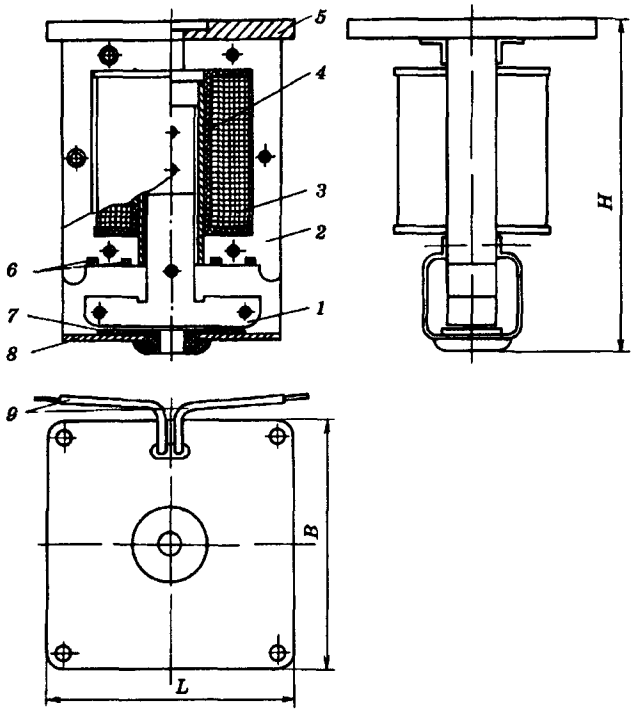


Рис. 34.2. Электромагнит переменного тока одностороннего действия

1— якорь; *2* — сердечник; *3* — обмотка; *4* — немагнитная втулка; *5* — фланец; *6* — короткозамкнутый виток; *7* — эластичная демпфирующая прокладка; *8* — немагнитная скоба-держатель; *9* — выводные провода

для продолжительного режима работы 12 и 24 В;
для импульсного режима работы 110 и 220 В.

В импульсном режиме работы обмотка электромагнита подключается через добавочный резистор для уменьшения времеии срабатывания.

Вибростойкость электромагнитов рассчитана на допустимые внешние механические вибрационные воздействия с частотами до 30 Гц и амплитудой от 0,3 до 1,5 мм и с частотами от 30 до 60 Гц с максимальным ускорением 20 м/с^2.

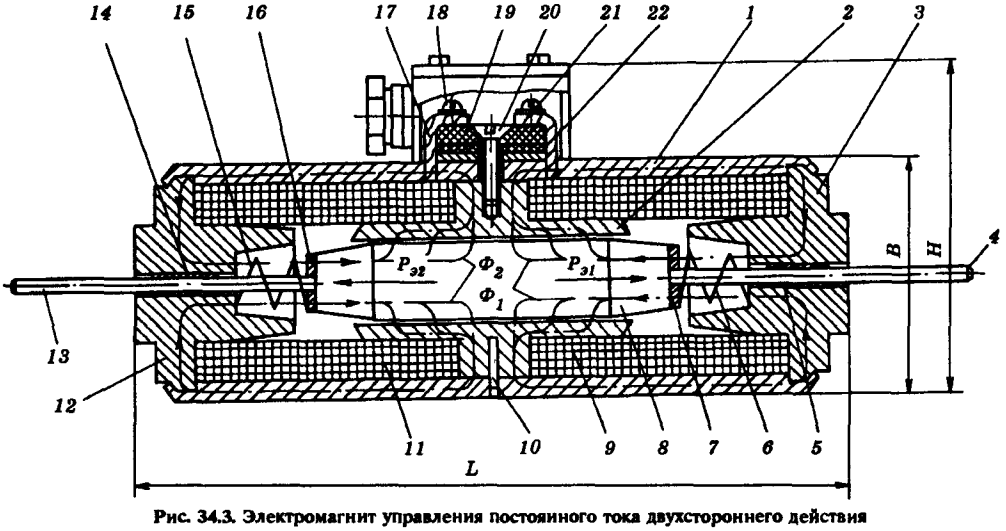


Рис. 34.3. Электромагнит управления постоянного тока двухстороннего действия

1 — корпус; *2* — сердечник; *3*, *12* — фланцы; *4*, *13* — приводные штоки; *5*, *14* — втулки; *6*, *15* — возвратные пружины; *7*, *16* — немагнитные прокладки; *8* — якорь; *9*, *11* — обмотки; *10* — соединительный штифт; *17* — выводные провода; *18*, *21* — контактные винты; *19* — монтажная колодка; *20* — крепящий винт; *22* — выводные провода; $P_{э1}$ — тяговое усилие, развиваемое якорем под действием магнитного потока Φ_1 при питании обмотки *9*; $P_{э2}$ — тяговое усилие, развиваемое якорем под действием магнитного потока Φ_2 при питании обмотки *11*

Таблица 34.1. Технические параметры электромагнитов серии ЭУ

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Время включения, с	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность, Вт	Габаритные размеры: ширина L × толщину B × высоту H, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
						Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$			
ЭУ2	100, 40	4	10 000	5	0,1	6,3	6,3	10,5	44×44×57	0,36/0,041
	15	6,3	3600	5	0,1	6,3	6,3	18,5	44×44×57	0,36/0,041
ЭУ3	100, 40	6,3	6000	5	0,14	6,3	6,3	15,5	52×52×67	0,65/0,083
	15	10	3600	5	0,14	6,3	6,3	24,5	52×52×67	0,65/0,083
ЭУ4	100, 40	10	6000	10	0,24	6,3	6,3	18,5	58×58×81	0,97/0,102
	15	16	2400	10	0,24	6,3	6,3	31,5	58×58×81	0,97/0,102
ЭУ5	100, 40	16	6000	10	0,24	6,3	6,3	19,5	60×60×96	1,45/0,178
	15	25	2400	10	0,24	6,3	6,3	40,0	60×60×96	1,45/0,178
ЭУ6	100, 40	25	3600	10	0,3	6,3	6,3	20,0	65×65×101	1,75/0,22
	15	40	1200	10	0,3	6,3	6,3	41,0	65×65×101	1,75/0,22
ЭУ7	100, 40	40	2400	15	0,46	4,0	4,0	43,0	80×80×132	3,7/0,465
	15	63	600	15	0,46	4,0	4,0	77,5	80×80×132	3,7/0,465
ЭУ8	100, 40	63	2400	15	0,54	3,0	3,0	48,0	90×90×142	5,0/0,65
	15	100	600	15	0,54	3,0	3,0	91,5	90×90×142	5,0/0,65
ЭУ9	100, 40	100	2400	15	0,56	3,0	3,0	57,0	100×100×152	6,9/0,85
	15	160	600	15	0,56	3,0	3,0	113,0	100×100×152	6,9/0,85

Электромагниты серии ЭМ29 (ТУ16-729.354-82). Предназначены для дистанционного управления исполнительными механизмами различного промышленного назначения. Серия состоит из пяти типоразмеров на номинальное напряжение питания 24 В постоянного тока. Электромагниты обеспечивают надежную работоспособность при допустимых внешних механических воздействиях:

вибрационных в диапазоне частот до 30 Гц с амплитудой 0,3—1,5 мм и от 30 до 60 Гц с максимальным ускорением 20 м/с^2;

ударных нагрузках с ускорением до 80 м/с^2 и длительностью удара 2—15 мс в направлении, перпендикулярном направлению движения якоря.

Электромагниты серии ЭМ31 (ТУ16-729.355-82). Предназначены для дистанционного управления исполнительными механизмами различного промышленного назначения, в том числе промышленных швейных машин.

Серия состоит из трех типоразмеров на номинальное напряжение 24 В постоянного тока.

Допустимые внешние механические воздействия такие же, как и для электромагнитов серии ЭМ29.

Электромагниты серии ЭМ35 (ТУ16-677.001-83, ОСТ 16 0.800.210-83). Предназначены для дистанционного пропорционального управления гидравлическими предохранительными и редукционными клапанами, дросселями, регуляторами потока газов и жидкостей.

Серия состоит из двух типоразмеров на номинальное напряжение 24 В постоянного тока.

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА [34.10]

Электротехнические параметры электромагнитов переменного тока представлены в табл. 34.4—34.8, а условия эксплуатации — в табл. 34.9.

Электромагниты серии МТ (ТУ16-529.021-79, ОСТ16 0.800.210-75). Предназначены для дистанционного управления гидравлическими, пневматическими и другими исполнительными механизмами.

Серия состоит из восьми типоразмеров на номинальные напряжения от сети однофазного переменного тока:

для частоты 50 Гц — 36, 110, 127, 220, 380, 400 и 415 В;

для частоты 60 Гц — 110, 220 и 440 В.

По вибростойкости электромагниты серии МТ допускают внешние механические вибрационные воздействия с частотой 50—100 Гц при ускорении 10 м/с^2.

Электромагниты серии ЭД (ТУ16-529.161-79, ОСТ 16 0.800.210-75). Применяются для дистанционного управления гидравлическими, пневматическими и другими механизмами. Электромагниты серии ЭД—длинноходовые.

Серия состоит из десяти типоразмеров на номинальные напряжения 110, 127, 220, 380, 500 и 660 В от сети однофазного переменного тока частотой как 50, так и 60 Гц. Кроме того, типоразмеры 2÷6 выпускаются с питанием на 36 В переменного тока частотой как 50, так и 60 Гц.

Таблица 34.2. Технические параметры электромагнитов постоянного тока серии ЭМ

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Время включения, с	Время отключения, с	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность, Вт	Габаритные размеры: ширина L × толщину B × высоту h, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
							Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$			
ЭМ25	100, 40	90	15 000	3,5	0,165	0,07	16	16	46	70×112×102	1,4/0,13
ЭМ26-6-У(Т)3	100, 40	27	10 000	5	0,05	0,05	16	16	11,1	80×50×72	0,68/0,05
ЭМ26-6-УХЛ4	100, 40	34	10 000	5	0,05	0,05	16	16	15,2	80×50×72	0,68/0,05
ЭМ29-3	100	10	12 000	10	0,15	0,13	16	16	23	95×60×125	0,77/0,12
	15	25	6000	10	0,14	0,07	16	16	145	95×60×125	0,77/0,12
ЭМ29-5	100	30	10 000	10	0,2	0,15	16	16	45	115×80×165	2,1/0,35
	15	75	3600	10	0,15	0,09	10	10	215	115×80×165	2,1/0,35
ЭМ29-6	100	50	6000	10	0,23	0,16	10	10	55	125×90×194	3,1/0,5
	15	125	2400	10	0,17	0,12	4	4	300	125×90×194	3,1/0,5
ЭМ29-7	100	80	3600	20	0,4	0,23	4	4	75	145×110×254	6,5/1,18
	15	200	1200	20	0,26	0,14	4	4	575	145×110×254	6,5/1,18
ЭМ29-8	100	100	2400	30	0,5	0,35	4	4	98	165×130×294	11,2/2,3
	15	250	1000	30	0,31	0,19	4	4	625	165×130×294	11,2/2,3
ЭМ31-5	100	30	10000	10	0,25	0,105	1	1	60	181×60×110	2,52/0,22
	15	60	2400	10	0,21	0,09	1	1	265	181×60×110	2,52/0,22
ЭМ31-6	100	50	3600	20	0,5	0,35	4	4	75	235×80×130	5,05/0,435
	15	100	1200	20	0,4	0,3	4	4	500	235×80×130	5,05/0,435
ЭМ31-8	100	100	1200	30	0,5	0,35	4	4	100	320×100×150	12,7/1,1
	15	200	720	30	0,5	0,3	4	4	600	320×100×150	12,7/1,1
ЭМ35-6	100	50	—	2	—	—	10	10	16,3	71×36×75	0,6/0,044
ЭМ35-8	100	140	4	—	—	—	—	—	22	93×36×110	2,5/0,12

Таблица 34.3. Условия эксплуатации электромагнитов постоянного тока

Тип	Климатическое исполнение	Окружающая среда		Максимальная высота над уровнем моря, м	Вид взаимодействия с исполнительным механизмом	Нормальное рабочее положение	Допустимое отклонение от нормального рабочего положения, град
		Температура, °С	Относительная влажность, %				
ЭУ	УХЛ,0	—5 ÷ +40	90 при 20 °С	2000	Одностороннее тянущее и толкающее	Вертикальное, допускается любое положение	—
ЭМ25	У	—40 ÷ +50	98 при 25 °С	2000	Одностороннее толкающее для ударных нагрузок	Вертикальное и горизонтальное	5 а любую сторону
	Т	—10 ÷ +50	98 при 35 °С	2000			
	УХЛ	+1 ÷ +50	80 при 25 °С	2000			
ЭМ28-6	У	—45 ÷ +90	98 при 25 °С	2000	Одностороннее толкающее	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	Т	—10 ÷ +50	98 при 35 °С	2000			
	УХЛ	+1 ÷ +50	80 при 25 °С	2000			
ЭМ29	УХЛ	—10 ÷ +40	90 при 25 °С	2000	Одностороннее тянущее и толкающее	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	0	+1 ÷ +45	80 при 35 °С	2000			
ЭМ31	УХЛ	—1 ÷ +40	90 при 20 °С	2000	Реверсивное	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	0	+1 ÷ +45	98 при 35 °С	2000			
ЭМ35	У3	—45 ÷ +40	98 при 25 °С	4300	Одностороннее толкающее для ударной нагрузки	Любое	—
	Т3	—10 ÷ +50	98 при 35 °С	4300			
	УХЛ4	—1 ÷ +50	80 при 25 °С	4300			

Электромагниты серии ЭМ33 (ТУ16-729.393-83). Применяются для дистанционного управления механизмами различного промышленного назначения.

Серия состоит из 10 типоразмеров на номинальные напряжения от сети однофазного переменного тока, В:

для частоты 50 Гц — 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500, 550 и 660;

для частоты 60 Гц — 110, 115, 220, 230, 380, 400, 415, 440 и 660.

Дополнительно электромагниты типоразмеров 1÷5 выпускаются на номинальные напряжения 24, 36, 60 В с частотой как 50, так и 60 Гц.

Вибростойкость электромагнитов допускает вибрационные механические воздействия с частотой 1—60 Гц при максимальном ускорении 20 м/с^2; а ударная стойкость — многократные ударные нагрузки с ускорением 80 м/с^2 с длительностью импульса 2—15 мс.

Электромагниты серии ЭМ34 (ТУ16-677.002-83). Предназначены для дистанционного управления исполнительными механизмами различного промышленного назначения.

Серия состоит из восьми типоразмеров на номинальные напряжения 24, 42, 60, 110, 220, 380 и 660 В переменного тока с частотой как 50, так и 60 Гц.

Электромагниты серии ЭМЛ 1203 (ТУ16-729.142-78). Предназначены для дистанционного управления гидравлическими, пневматическими и другими исполнительными механизмами станков и других машин. Серия имеет один типоразмер на номинальные напряжения 24, 36, 42, 60, 110, 230, 380 В однофазной сети переменного тока с частотой как 50, так и 60 Гц.

Вибростойкость электромагнитов допускает внешние вибрационные механические воздействия частотой до 30 Гц при амплитуде от 0,3 до 1,5 мм.

Ударная стойкость электромагнитов допускает ударные нагрузки с ускорением 80 м/с^2 и длительностью удара от 2 до 15 мс в направлении, перпендикулярном направлению движения якоря.

Электромагниты серии МИС (ТУ16-529.009-81). Предназначены для дистанционного управления исполнительными органами станков и механизмов. Серия состоит из шести типоразмеров. Номинальное напряжение 110, 127, 220, 230, 380, 400, 415, 440 и 500 В однофазного переменного тока частотой как 50, так и 60 Гц.

Исполнение выводов катушки: жесткие или гибкие выводы.

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ С ПИТАНИЕМ ОТ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ [34.10]

В конструкцию электромагнитов входит двухполупериодный выпрямительный мост. Поэтому обмотки электромагнитов могут подключаться к источнику переменного тока через выпрямительный мост или к источнику постоянного тока без выпрямительного моста. Технические параметры электромагнитов представлены в табл. 34.10, а условия эксплуатации — в табл. 34.11.

Электромагниты серии ЭМ24 (ТУ16-729.302-81 и ОСТ 16 0.800.210-83). Предназначены для дистанционного управления гидравлическими распределителями. Серия состоит из двух типоразмеров: четвертого и пятого.

Таблица 34.4. Технические параметры электромагнитов серии МТ

Тип	Режим работы, ПВ%	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность, Вт		Коэффициент мощности cos φ		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
					Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$	пусковая	рабочая	пусковой	рабочий		
МТ22	100, 40	4	2400	5	6,3	4	54	9	0,75	0,51	44×44×67	0,36/0,0588
	15	6,3	1200	5	6,3	4	80	9	0,75	0,51	50×50×74	0,43/0,0588
МТ32	100, 40	6,3	2400	5	6,3	4	60	10	0,63	0,38	52×52×67	0,45/0,066
	15	10	1200	5	6,3	4	96	17	0,63	0,38	58×58×74	0,53/0,066
МТ42	100, 40	10	2400	10	6,3	6,3	150	18	0,65	0,36	58×58×81	0,65/0,145
	15	16	1200	10	6,3	6,3	250	22	0,65	0,36	64×64×90	0,83/0,145
МТ52	100, 40	16	1200	10	6,3	6,3	200	22	0,61	0,32	60×60×81	0,8/0,189
	15	25	600	10	6,3	6,3	400	40	0,61	0,32	66×66×90	0,97/0,189
МТ62	100, 40	25	1200	10	6,3	6,3	280	27	0,6	0,4	65×65×81	1,0/0,241
	15	40	600	10	6,3	6,3	500	50	0,6	0,4	71×71×90	1,2/0,241
МТ72	100, 40	40	1200	15	3	1	420	35	0,45	0,32	80×80×105	2,09/0,47
	15	63	600	15	3	1	700	60	0,45	0,32	87×87×105	2,39/0,47
МТ82	100, 40	63	600	15	2,5	1	480	45	0,37	0,29	90×90×105	2,67/0,614
	15	100	300	15	2,5	1	900	70	0,37	0,29	97×97×113	3,04/0,614
МТ92	100, 40	100	300	15	0,63	0,63	650	70	0,43	0,3	100×100×127	5,391/1,43
	15	160	120	15	0,63	0,63	1000	80	0,43	0,3	107×107×135	5,82/1,43

Таблица 34.5. Технические параметры электромагнитов серии ЭД

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность, Вт		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
					Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$	пусковая	рабочая		
ЭД-2	100, 40	4	2400	10	3	1,5	330	20	58×72×44	0,49/0,16
	15	6,3	1200	10	3	1,5	330	20	58×72×44	0,49/0,16
ЭД-3	100, 40	6,3	2400	10	3	1,5	330	20	65×74×52	0,57/0,18
	15	10	1200	10	3	1,5	330	20	65×74×52	0,57/0,18
ЭД-4	100, 40	10	2400	15	2,5	1,25	330	20	70×94×98	0,9/0,257
	15	16	1200	15	2,5	1,25	330	20	70×94×98	0,9/0,257
ЭД-5	100, 40	16	2400	15	2,5	1,25	470	26	72×94×60	1,1/0,305
	15	25	1200	15	2,5	1,25	470	26	72×94×60	1,1/0,305
ЭД-6	100, 40	25	1200	20	2,5	1,25	760	30	77×113×65	1,62/0,4
	15	40	600	20	2,5	1,25	760	30	77×113×65	1,62/0,4
ЭД-7	100, 40	40	1200	25	2,5	1,25	800	34	91×139×80	2,5/0,771
	15	63	600	25	2,5	1,25	800	34	91×139×80	2,5/0,771
ЭД-8	100, 40	63	1200	25	2,5	1,25	800	34	101×139×80	3,35/1,15
	15	100	600	25	2,5	1,25	800	34	101×139×80	3,35/1,15
ЭД-9	100, 40	100	600	30	1	0,5	1700	65	112×160×100	5,15/1,81
	15	160	120	30	1	0,5	1700	65	112×160×100	5,15/1,81
ЭД-10	100, 40	160	120	40	0,3	0,15	2300	120	144×215×126	10/2,453
ЭД-11	100, 40	25	120	40	0,3	0,15	2300	140	144×215×140	12/2,98

Номиинальные напряжения, В:

от источников постояиного тока — 12, 24, 48, 110 (пятый типоразмер);

от источника переменного тока для частоты 50 Гц — 24, 36, 110, 220, 380, для частоты 60 Гц — 220 (четвертый типоразмер).

Допускается работа электромагнитов в среде, насыщенной масляной пылью, каплями и брызгами масла с температурой не более 60 °С.

Электромагниты серии ЭМ37 (ТУ16-677.011-86, ОСТ 16 0.800.210-83). Предназначены для дистанционного управления клапанами трубопроводов промышленных установок.

Серия состоит из восьми типоразмеров на иоминальные напряжеиия питания, В:

постоянного тока — 12, 24, 110, 220;

переменного тока частотой 50 Гц — 24, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400 и 415;

перемениого тока частотой 60 Гц — 110, 127, 220, 380, 440.

Вибростойкость электромагнитов допускает внешние механиические вибрационные воздействия с частотой 5—10 Гц с ускорением 7 м/с^2.

Ударная стойкость электромагнитов допускает ударные нагрузки с ускорением 30 м/с^2 с частотой ударов от 40 до 80 в минуту.

Электромагниты серии ЭМ38 (ТУ16-677.001-83). Предназначены для работы в качестве приводов клапаиов серии СВВ в системах дистанционного и автоматического управления на трубопроводах промышленных установок со следующей средой: пар, вода, воздух.

Серия состоит из двух типоразмеров, которые отличаются разновидностью питания: от источника постоянного тока или от источника переменного тока.

Номинальиые иапряжеиия, В:

постоянного тока — 110 и 220;

переменного тока — 220, 230, 240, 400, 415, 440 частотой как 50, так и 60 Гц через двухполупериодный выпрямительиый мост.

Электромагниты серии ЭМП (ТУ16-529, 409-81 и ОСТ 16 0.800.210-83). Предназначены для работы в качестве веитилей иа трубопроводах промышлениых установок.

Серия состоит из четырех типоразмеров.

Номииальные напряжения, В:

постояниого тока — 12, 24, 110, 220;

перемеииого тока частотой 50 Гц — 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415 и частотой 60 Гц — 110, 127, 220, 380, 440.

Допускается работа электромагнитов в средах газообразного и жидкого аммиака, фреона, рассола, воды и воздуха под давлеиием до $1{,}569 \cdot 10^6$ Па и при температуре от —40 до +45 °С.

Таблица 34.6. Технические параметры электромагнитов серии ЭМ33

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Время включения, с	Время отключения, с	Износостойкость		Номиальная потребляемая мощность		Коэффициент мощности, cos φ		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
							Вертикальное положение, циклы ×10⁶	Горизонтальное положение, циклы ×10⁶	пусковая, В·А	рабочая, Вт	пусковой	рабочий		
ЭМ33-1	100, 40	4	2600	10	0,15	0,2	3	3	133	8	0,78	0,3	44×54×77,5	0,435/0,09
	15	6,3	1300	10	0,16	0,2	3	3	190	10	0,75	0,28	44×54×77,5	0,435/0,09
ЭМ33-2	100, 40	6,3	2600	10	0,15	0,2	3	3	190	10	0,75	0,28	52×56×77,5	0,45/0,09
	15	10	1300	10	0,16	0,2	3	3	708	30	0,69	0,35	52×56×77,5	0,45/0,09
ЭМ33-3	100, 40	10	2600	15	0,2	0,22	3	3	708	30	0,69	0,35	60×70×95	0,915/0,24
	15	16	1300	15	0,22	0,22	3	3	710	32	0,7	0,39	60×70×95	0,915/0,24
ЭМ33-4	100, 40	16	2600	15	0,2	0,22	4	4	710	32	0,7	0,39	60×70×95	0,975/0,28
	15	25	1300	15	0,22	0,22	4	4	1190	40	0,7	0,33	60×70×95	0,975/0,28
ЭМ33-5	100, 40	25	1600	20	0,2	0,22	4	4	1190	40	0,7	0,33	65×75×143	1,265/0,385
	15	40	800	20	0,22	0,22	4	4	2210	52	0,37	0,31	65×75×143	1,265/0,385
ЭМ33-6	100, 40	40	1600	25	0,26	0,22	3	3	2210	52	0,37	0,31	80×94×142	2,5/0,68
	15	63	800	25	0,28	0,22	3	3	2900	65	0,45	0,32	80×94×142	2,5/0,68
ЭМ33-7	100, 40	63	1500	25	0,28	0,25	3	3	2900	65	0,45	0,32	90×94×142	3,06/0,932
	15	100	750	25	0,3	0,25	3	3	4845	100	0,32	0,37	90×94×142	3,06/0,932
ЭМ33-8	100, 40	100	600	30	0,28	0,25	1,6	1,6	4845	100	0,32	0,37	100×100×161	5,2/1,735
	15	160	120	30	0,3	0,25	1,6	1,6	8250	135	0,5	0,3	100×100×161	5,2/1,735
ЭМ33-9-1	100, 40	160	120	40	0,13	0,16	0,3	0,3	8250	135	0,5	0,3	121×120×180	6,53/2,1
ЭМ33-9-2	100, 40	250	120	40	0,145	0,175	0,3	0,3	17 200	325	0,5	0,3	141×167×206,5	11,5/3,8

Таблица 34.7. Технические параметры электромагнитов серии ЭМ34 и ЭМЛ1203

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Время включения, с	Время отключения, с	Износостойкость		Потребляемая мощность		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
							Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$	пусковая, В·А	рабочая, Вт		
ЭМ34-1	100	4	2400	5	0,075	0,055	10	10	—	16	44×44×67	0,43/0,06
	40	5	2000	5	0,085	0,055	10	10	—	19	44×44×67	0,43/0,06
	15	6,3	1200	5	0,12	0,055	10	10	—	25	44×44×67	0,43/0,06
ЭМ34-2	100	6,3	2400	5	0,08	0,055	10	10	—	22	44×44×67	0,45/0,066
	40	7,3	2000	5	0,09	0,055	10	10	—	27	44×44×67	0,45/0,066
	15	10	1200	5	0,13	0,055	10	10	—	40	44×44×67	0,45/0,066
ЭМ34-3	100	10	2400	5	0,1	0,09	10	10	—	24	58×58×72	0,8/0,145
	40	12	2000	10	0,11	0,09	10	10	—	28	58×58×72	0,8/0,145
	15	16	1200	10	0,145	0,09	10	10	—	42	58×58×72	0,8/0,145
ЭМ34-4	100	16	1500	10	0,11	0,1	10	10	—	26	60×60×71	0,9/0,14
	40	18	1000	10	0,12	0,1	10	10	—	32	60×60×71	0,9/0,14
	15	25	600	10	0,155	0,1	10	10	—	46	60×60×71	0,9/0,14
ЭМ34-5	100	25	1500	10	0,115	0,105	10	10	—	35	65×65×72	1,18/0,24
	40	30	1000	10	0,125	0,105	10	10	—	42	65×65×72	1,18/0,24
	15	40	600	10	0,16	0,105	10	10	—	58	65×65×72	1,18/0,24
ЭМ34-6	100	40	1200	10	0,12	0,13	10	10	—	40	80×80×105	2,39/0,47
	40	48	1000	10	0,13	0,13	10	10	—	48	80×80×105	2,39/0,47
	15	63	600	10	0,17	0,13	10	10	—	70	80×80×105	2,39/0,47
ЭМ34-7	100	63	600	10	0,13	0,185	3	3	—	45	90×90×105	3,04/0,615
	40	72	500	15	0,14	0,185	3	3	—	54	90×90×105	3,04/0,615
	15	100	300	15	0,2	0,185	3	3	—	78	90×90×105	3,04/0,615
ЭМ34-8	100	100	300	15	0,14	0,2	1	1	—	65	100×100×127	5,82/1,43
	40	125	200	15	0,15	0,2	1	1	—	75	100×100×127	5,82/1,43
	15	160	120	15	0,22	0,2	1	1	—	90	100×100×127	5,82/1,43
ЭМЛ1203*	100, 40	47	7200	35	0,15	0,15	3	3	528	25	70×120×92	1,1/0,17

* Коэффициент мощности cos φ: пусковой 0,417; рабочий 0,313.

Таблица 34.8. Технические параметры электромагнитов серии МИС

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность*		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса, кг
					Вертикальное положение, циклы $\times 10^6$	Горизонтальное положение, циклы $\times 10^6$	пусковая	рабочая		
МИС-1	100, 40	15	2400	15	3	1,5	260	12	71×72×60	0,72
	10	21	600	15	3	1,5	—	—	71×72×60	0,72
МИС-2	100, 40	21	1200	20	3	1,5	500	14	80×82×79	1,2
	10	30	600	20	3	1,5	770	26	80×82×79	1,2
МИС-3	100, 40	30	1200	20	3	1,5	720	25	80×61×79	1,5
	10	42	600	20	3	1,5	870	36	80×61×79	1,5
МИС-4	100, 40	42	1200	25	3	1,5	680	30	101×99×104	2,63
	10	60	600	25	3	1,5	900	65	101×99×104	2,63
МИС-5	100, 40	60	1200	25	1	0,5	850	60	102×108×104	3,5
	10	85	600	25	1	0,5	1200	10	102×108×144	3,5
МИС-6	100, 40	85	300	30	1	0,5	1500	45	104×114×184	3,9
	10	120	300	30	1	0,5	—	—	104×114×184	3,9

* Номинальная потребляемая мощность для постоянного тока — Вт, для переменного — В · А.

Таблица 34.9. Условия эксплуатации электромагнитов переменного тока

Серия	Климатическое исполнение	Окружающая среда		Максимальная высота над уровнем моря, м	Вид взаимодействия с исполнительным механизмом	Нормальное рабочее положение	Допустимое отклонение от нормального рабочего положения, град
		Температура, °С	Относительная влажность, %				
МТ	У	—40 ÷ +40	90 при 25 °С	2000	Одностороннее толкающее	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	УХЛ	—40 ÷ +40	90 при 25 °С	2000			
	Т	—40 ÷ +40	90 при 25 °С	2000			
ЭД	У	—40 ÷ +40	98 при 20 °С	2000	Одностороннее толкающее илн тянущее	Вертикальное и горизонтальное	—
	Т	—40 ÷ +40	98 при 20 °С	2000			
ЭМ33	У	—45 ÷ +40	80 при 20 °С	4300	Одностороннее тянущее или тянущее и толкающее	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	УХЛ	+1 ÷ +35	65 при 20 °С	4300			
	Т	—10 ÷ +45	80 при 25 °С	4300			
ЭМ34	У3	—45 ÷ +40	98 при 25 °С	4300	Одностороннее толкающее	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	УХЛ	+1 ÷ +35	80 при 25 °С	4300			
	Т3	—10 ÷ +45	98 при 35 °С	4300			
ЭМЛ1203	У3	—30 ÷ +40	98 при 25 °С	4300	Одностороннее толкающее	Вертикальное и горизонтальное	3 в любую сторону
	УХЛ4	+1 ÷ +35	98 при 35 °С	4300			
	Т3	—10 ÷ +50	98 при 25 °С	4300			
МИС	У3	—40 ÷ +40	65 при 20 °С	2000	Одностороннее тянущее или толкающее	Вертикальное	—
	Т3	—40 ÷ +40	80 при 25 °С	2000			

При отсутствии в табл. 34.4—34.8, 34.10 значений коэффициентов мощности $\cos\varphi$ можно принять значения:

коэффициент мощности пусковой $\cos\varphi = 0{,}6 \div +0{,}7$;

коэффициент мощности рабочий $\cos\varphi = 0{,}35 \div +0{,}4$.

ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЕ МУФТЫ

Наиболее широко распространены фрикционные многодисковые (рис. 34.4) и ферропорошковые электромагнитные муфты. В табл. 34.12 приведены данные некоторых отечественных фрикционных муфт системы ЭТМ.

Таблица 34.10. Технические параметры электромагнитов с питанием от источников постоянного и переменного тока

Тип	Режим работы, ПВ %	Номинальное тяговое усилие, Н	Номинальная частота включений, циклы в час	Номинальный ход якоря, мм	Время включения, с	Время отключения, с	Износостойкость		Номинальная потребляемая мощность*		Коэффициент мощности cos φ		Габаритные размеры: ширина × толщину × высоту, мм	Масса электромагнита/якоря, кг
							Вертикальное положение, циклы ×10⁶	Горизонтальное положение, циклы ×10⁶	пусковая, В·А	рабочая, Вт	пусковой	рабочий		
ЭМ24-4	100, 40	18	7,2·103	2,5	0,03	0,05	20	20	210	35	0,476	0,398	71×43×71	0,48
ЭМ24-5	100, 40	25	15·103	2,5	0,04	0,05	20	20	—	22	71	—	71×43×71	0,48
ЭМ37-11	100	12	120	1,5	0,15	0,1	1,5	—	—	—	—	—	36×75×68	0,36/0,033
ЭМ37-12	100	12	2400	1,5	0,25	0,2	1,5	—	—	—	—	—	36×75×68	0,36/0,033
ЭМ37-13	100	4	2400	5	0,25	0,2	1,5	—	—	—	—	—	43×73×80	0,58/0,05
ЭМ37-14	100	5	120	5	0,15	0,1	1,5	—	—	—	—	—	43×73×80	0,58/0,05
ЭМ37-16	100	17	2400	2	0,2	0,2	1,5	—	—	—	—	—	62×87×115	1,3/0,09
ЭМ37-22	100	5	120	16	0,2	0,15	1,5	—	—	—	—	—	62×87×115	1,3/0,09
ЭМ37-23	100	14	2400	6	0,25	0,2	1,5	—	—	—	—	—	62×87×115	1,3/0,1
ЭМ37-26	100	7	2400	16	0,4	0,3	1,5	—	—	—	—	—	62×87×115	,3/0,11
ЭМ38-1, ЭМ38-2	5	120	120	30	0,4	0,1	0,1	0,1	—	160	—	—	172×120×300	10,4
Постоянный ток														
ЭМП-1	100	16,7	60	2	10	—	0,15—0,3		—	20	—	—	89×75×126	1,35
ЭМП-2	100	9,8	60	6	10	—	0,15—0,3		—	20	—	—	89×75×126	1,35
ЭМП-4	100	5,9	60	14	10	—	0,15—0,3		—	20	—	—	89×75×126	1,35
Переменный ток														
ЭМП-1	100	6,9	60	2	10	—	0,15—0,3		40	—	—	—	89×75×126	1,35
ЭМП-2	100	6,9	60	6	10	—	0,15—0,3		40	—	—	—	89×75×126	1,35
ЭМП-3	100	11,7	60	2	10	—	0,15—0,3		40	—	—	—	89×75×126	1,35
ЭМП-4	100	4,4	60	14	10	—	0,15—0,3		40	—	—	—	89×75×126	1,35

* Номинальная потребляемая мощность для постоянного тока измеряется в Вт, для переменного тока В·А

Таблица 34.11. Условия эксплуатации электромагнитов с питанием от источников постоянного и переменного тока

Серия	Климатическое исполнение	Окружающая среда		Максимальная высота над уровнем моря, м	Вид взаимодействия с исполнительным механизмом	Нормальное рабочее положение	Допустимое отклонение от нормального рабочего положения, град
		Температура, °С	Относительная влажность, %				
ЭМ24	У	—40 ÷ +50	98 при 25 °С	4300	Одностороннее толкающее для ударной нагрузки	Вертикальное и горизонтальное	5 в любую сторону
	Т	—10 ÷ +50	98 при 35 °С	4300			
	УХЛ	+1 ÷ +50	80 при 25 °С	4300			
ЭМ37	У3	—50 ÷ +50	98 при 25 °С	2000	Одностороннее тянущее	Вертикальное (якорем вниз)	15 в любую сторону
	У5	—50 ÷ +65	98 при 35 °С	2000			
	Т3	—50 ÷ +50	98 при 35 °С	2000—4300			
ЭМ38	У	—40 ÷ +40	8 при 25 °С	4300	Одностороннее тянущее	Любое	—
	Т	—10 ÷ +45	98 при 35 °С	4300			
ЭМП	У3	—50 ÷ +50	—	2000	Одностороннее толкающее или тянущее	Вертикальное	15 в любую сторону
	Т3	—50 ÷ +50	—	2000			

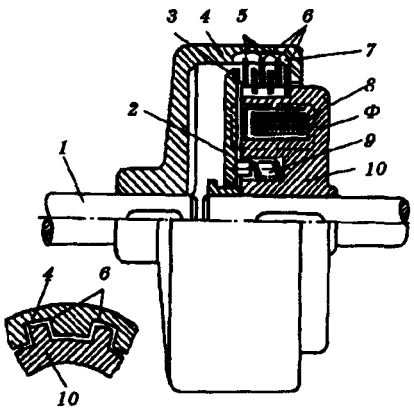


Рис. 34.4. Устройство многодисковой фрикционной муфты

1 — ведущий и ведомый вал; *2* — якорь; *3* и *7* — направляющие прорези для фрикционных дисков; *4* и *10* — несущие элементы, связанные с валами; *5* и *6* — диски сцепления; *8* — обмотка управления; *9* — возвратная пружина; *Ф* — рабочий магнитный поток

Для порошковых муфт серии МПБ, имеющих частоту вращения вала до 2000 об/мин, допускается возможность регулирования передаваемого момента в диапазоне от 0,1 до 1,0 максимального. В табл. 34.13 представлены параметры таких муфт [34.8].

34.3. КОНТАКТОРЫ И ПУСКАТЕЛИ

Контактор — это двухпозиционный коммутационный аппарат с самовозвратом, предназначенный для частых коммутаций токов, не превышающих токов перегрузки, и приводимый в действие приводом [34.2, 34.8] (табл. 34.14).

Пускатель — это коммутационный аппарат для прямого пуска, остановки и защиты электродвигателей.

Таблица 34.12. Электромагнитные муфты серии ЭТМ

Габарит муфты	Время запаздывания (трогания) t_0, мс	Время переключения $t_п$, мс	Постоянная времени цепи управления τ, мс	Номинальный момент муфты $M_{ном}$, Н·м
01	1,2	17	1,2	2,5
02	1,5	25	1,8	4,0
03	1,7	30	2,0	5,3
04	1,9	35	2,5	10
05	2,2	40	3,0	16
06	2,8	50	3,5	25
07	3,0	60	5,0	40
08	3,1	75	6,0	63
09	3,5	100	8,0	100
10	4,1	120	9,0	160
11	4,5	100	16,0	250
12	5,5	100	21,0	400
13	—	130	—	1000
14	—	150	—	1000
15	—	150	—	2500
16	—	150	—	4000

Примечание. Частота вращения n, об/мин, и ток управления $i_{упр}$, А, для некоторых габаритов муфт ЭТМ:

Габарит	n	$i_{упр}$
0,5	5000—7000	0,3—0,4
10	2800—3600	0,9—1,2
15	1600—2500	4,02—25,6

Таблица 34.13. Порошковые муфты МПБ

Параметр	Серия муфты						
	МПБ-63-2	МПБ-40-2	МПБ-25-2	МПБ-10-2	МПБ-4-2	МПБ-6-2	МПБ-63-2
Передаваемый момент, Н·см	630	400	250	100	40	20	6,3
Остаточный момент, Н·см	60	30	20	10	2	1,1	0,5
Ток управления, А	45	0,40	0,32	0,22	0,18	0,16	0,16
Срок службы, ч	500	500	1000	1000	500	1000	1000
Масса, кг	5,3	4,2	3,2	1,65	0,95	0,38	0,31

ПРИМЕРНЫЙ ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОНТАКТОРА И ПУСКАТЕЛЯ

Заданы: иоминальный ток главных контактов $I_{ном}$; предельный отключаемый ток $I_п = (5÷20)I_{ном}$; номинальное напряжение $U_{ном}$; электрическая износостойкость $N_{эл}$; относительная продолжительность включений, ПВ %; частота циклов включено—отключено Z в час.

1. Определяется сечеиие токоведущих частей в режиме протекаиия $I_{ном}$ из условия, чтобы температура нагрева не превышала допустимую по классам нагревостойкости изоляции, с которой соприкасается коиструктивно токоведущая часть. Для кратковременного и повторно-кратковремеиного режимов расчет проводится по эквивалеитному продолжительному току. С учетом нагрева дугой токоведущих частей эквивалентный ток, который вызвал бы тот же нагрев, что и номинальный ток при длительном его протекании, примерно равен:

$$I_э \approx I_{ном} \frac{ПВ\%}{100} + \frac{Z}{600}\sqrt{\frac{ПВ\%}{100}}.$$

2. По найденному сечению токоведущих частей рассчитывается термическая стойкость аппарата — токи $I_к$ и время $t_в$, где $I_к = (1,1+1,5)I_п$, $t_в = 1,5÷10$ с. Обычио ток термической стойкости должен быть не ниже предельно отключаемого тока $I_п$, чтобы не увеличивать сечение токоведущих частей при сопоставимых значениях термической стойкости и длительности протекания предельно отключаемого тока.

3. Рассчитывается сила нажатия в контактах $P_к$ в режиме длительного протекания номинального тока из условия, чтобы температура нагрева контактной точки не превышала допустимую.

4. При найденном (в п. 2) токе термической стойкости (иногда при предельном отключаемом токе) рассчитывается сила контактной пружины, при которой ие происходит приваривания контактов и предотвращается их отброс вследствие электродинамических усилий. При переменном токе в расчет прииимается ударный ток

$$I_у = \sqrt{2}\, K_у I_к,$$

где $I_к$ — действующее значение предельного тока; $K_у$ — ударный коэффициент (для низковольтных сетей и установок $K_у = 1,3$).

Результирующая сила контактной пружииы выбирается как наибольшая из полученных при расчетах в пп. 3 и 4. По ней рассчитываются конструктивные параметры контактных пружин.

5. Рассчитывается раствор контактов из условия надежного гашения малых критических токов. При постоянном токе раствор контактов может быть прннят равным критической длине дуги $l_{кр}$. Обычно раствор контактов не превышает 20 мм.

6. Рассчитываются параметры системы магнитного дутья и дугогасительной системы, при которых обеспечивается надежное гашение дуги в течение времени, не превышающего 0,1 с, во всем диапазоне отключаемых токов — от 5 А до $I_{ном}$.

7. Рассчитывается наружная поверхность охлаждения $S_н$ дугогасительной камеры.

8. По заданной коммутационной износостойкости контактов $N_к$ рассчитывается объем материала контактов для их износа. Необходимое при расчете время дуги $t_д$ определяется в п. 6. По найденному объему V_0 н заданной ширнне контакта определяют лннейный износ контактов $\sigma_л$ и по нему провал контактов

$$a \approx 2{,}5\sigma_л.$$

9. По кннематической схеме контактора находнтся коэффициент приведення $K_{пр}$ сил и расстояний к воздушному зазору тягового электромагнита. С учетом $K_{пр}$ на графике зависимости тягового усилия электромагнита от значения воздушного зазора между якорем и сердечнпком откладываются приведенные значения провала, раствора контактов, силы нажатия в контактах и наносится часть противодействующей характеристики, обусловленная рассчнтанной силой контактных пружин, силой выбранной возвратной пружины и массой подвижной системы.

По построенной характеристнке противодействующих сил выбирается тип тягового электромагнита и рассчитываются параметры магнитной системы.

При необходимости рассчнтываются коэффицнент возврата и вибрация контактов при включении.

Таблица 34.14. Характеристика режимов, соответствующая разным категориям применения контакторов

Категория применения	Основное применение	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
		Включение			Отключение			Включение			Отключение		
		Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи, или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи, или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи, или постоянная времени, мс	Коммутируемый ток в отношении к номинальному рабочему току	Напряжение в отношении к номинальному рабочему напряжению	Коэффициент мощности цепи, или постоянная времени, мс
	Переменный ток												
A_1	Электропечи, сопротивления. Активная или слабоиндуктивная нагрузка	1	1	0,95	1	1	0,95	—	—	—	—	—	—
A_2	Пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противотоком	2,5	1	0,65	2,5	1	0,65	4	1,1	0,65	4	1,1	0,65
A_3	Пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся электродвигателей	6	1	0,35	1	0,17	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
A_4	Пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей. Реверсирование электродвигателей	6	1	0,35	6	1	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
	Постоянный ток												
$Д_1$	Электропечи, сопротивления. Активная или слабоиндуктивная нагрузка	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
$Д_2$	Пуск электродвигателей, отключение вращающихся электродвигателей	2,5	1	10	2	0,3	10	10	1,1	10	10	1,1	10
$Д_3$	Пуск электродвигателей, отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей	2,5	1	10	2,5	1	10	10	1,1	10	10	1,1	10

Примечание: 1. Режимы, характеризующие применение контакторов для коммутации конденсаторов и ламп с вольфрамовой нитью, не нормируются. 2. Переменный ток выражен действующим значением симметричной составляющей. 3. Допуск на коэффициент мощности ±0,05; допуск на постоянную времени ±15 %.

Приближенная оценка времени первого отброса контактов может быть сделана по формуле

$$t_1 \approx mv/P_{пр},$$

где m — масса подвижного контакта; v — скорость подвижного контакта к моменту удара о неподвижный; $P_{пр}$ — сила предварительного сжатия контактной пружины.

Суммарное время вибрации не должно превышать нескольких миллисекунд.

КОНТАКТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Технические данные наиболее распространенных контакторов постоянного тока приведены в табл. 34.15. На рис. 34.5 дана конструктивная схема одной из наиболее распространенных разновидностей таких контакторов КПВ 600.

КОНТАКТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общие технические параметры наиболее распространенных контакторов даны в табл. 34.16; временные параметры и токи обмоток для некоторых контакторов — в табл. 34.17.

На рис. 34.6 дана конструктивная схема контактора серии КТ6000 для тяжелых режимов работы. Для некоторых типов таких контакторов в табл. 34.18 приведены значения допустимых токов для разных режимов работы.

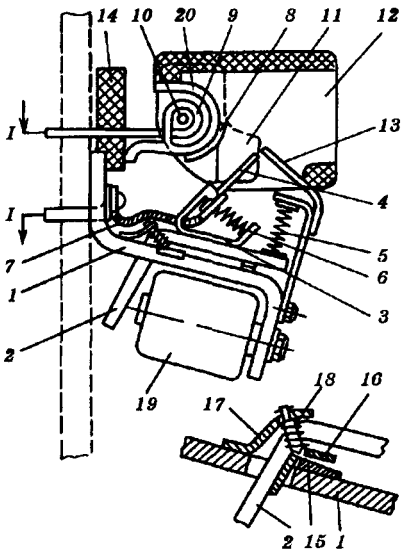


Рис. 34.5. Конструктивная схема контактора КПВ 600

1 — стальная скоба-основание; *2* — якорь; *3* — скоба; *4* и *8* — подвижный и неподвижный контакты; *5* — возвратная пружина; *6* — контактная пружина; *7* — медная гибкая связь; *9* — катушка магнитного дутья (м.д.); *10* — сердечник системы м.д.; *11* — стальные полюсы м.д.; *12* — дугогасительная камера; *13* и *20* — дугогасительные рога; *14* — изоляционное основание; *15* — вставка — призма вращения; *16* — сменная пластина; *17* — планка; *18* — пружина; *19* — включающая катушка; *I* — коммутируемый ток

Таблица 34.15. Технические характеристики контакторов постоянного и переменного тока

Тип	Номинальные		Обмотка		Собственное время, с		Износостойкость, циклы		Допустимая частота срабатываний, циклы в час
	напряжение, В	ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	включения	отключения	механическая	коммутационная	
Контакторы постоянного тока									
КП1	220	20, 40, 75	110	20	0,1	0,04	—	—	1200
КП2	220	20, 40, 75	220	180	0,2—0,3	0,1	—	—	240
КП7	660	2500	110, 220	180	0,25	0,07	—	—	240
КП207	600	2500	110, 220	30—70	0,2	0,25	10^7	—	300—1200
КПВ600	220	63, 100, 160, 250, 630	110, 220	180	0,2—0,3	0,1	—	—	240
КМВ621	220	50	40—220	—	0,05	—	—	—	—
КПД100	220	25—250	110—440	35	—	—	10^7	10^6	1200
Контакторы постоянного и переменного тока									
МК1	220, 500	40	24—200	38	0,06	0,04	10^7	—	—
КМ200	220, 380	До 600	До 380	50	—	—	—	—	600
КМ3-0	220, 380	40	127—220	—	—	—	10^6	—	—
РПК1	440, 500	10	До 500	—	—	—	10^7	—	—
КН100—КН400	200	25—200	До 320	10—50	0,15	0,03	—	—	—

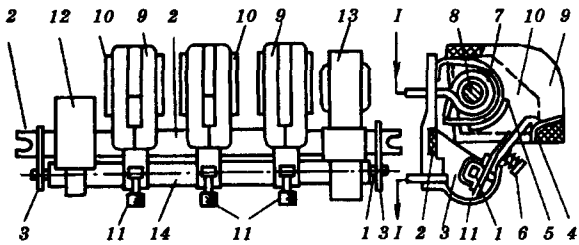


Рис. 34.6. Конструктивная схема контактора КТ6000

1 — вал; *2* — металлическая изолированная рейка; *3* — подшипники; *4* и *5* — подвижный и неподвижный контакты; *6* — контактная пружина; *7* — катушка магнитного дутья (м.д.); *8* — сердечник системы м.д.; *9* — дугогасительная камера; *10* — полосы системы м.д.; *11* — гибкая медная связь; *12* — узел вспомогательных контактов; *13* — электромагнит; *14* — изоляционный слой на металлическом валу; *I* — коммутируемый ток

Таблица 34.16. Технические параметры контакторов переменного тока

Тип	Номинальные		Число полюсов	Допустимая частота включений, 1/ч	Дополнительные сведения
	напряжение, В	ток, А			
КТ6000	380 и 660	100, 160, 250, 400, 630, 1000	2, 3, 4 и 5	1200	Для тяжелых режимов работы; конструктивная схема на рис. 34.6; $N_м = 10^7$; $I_к = 10$ кА; $I_{т.с} = 7$ кА при $t = 0{,}2$ с; $U_{вт} = 127, 380$ В
КТ7000	380 и 660	100, 160	2, 3, 4 и 5	600	$N_м = 10^7$; $U_{вт} = 127, 220$ и 380 В
КВДК630	660	630	3	3800	Вакуумный контактор; $N_м = 2 \cdot 10^6$
КТД121	500	40	3	1200	—
КТПВ600	380	63, 100, 160—250	2	1200	Для управления асинхронными двигателями в тяжелых условиях смешанного питания металлургических приводов, где требуются повышенные $N_м$ и $N_к$, $U_{вт} = 110$ и 220 В (постоянный ток)
КТП6000	380 и 660	100, 160, 250, 400 и 630	2, 3 и 4	1200	$N_м = 15 \cdot 10^6$; $U_{вт} = 24, 48, 110$ и 220 В (постоянный ток)
К1000	1600	400 (без охлаждения водой); 800 (при охлаждении водой и частоте 800 Гц)	2, 3	—	Контакторы на повышенную частоту тока от 500 до 8000 Гц; $U_{вт} = 127, 220$ и 380 В

Примечание: $U_{вт}$ — напряжение втягивающей обмотки; $N_м$ и $N_к$ — механическая и коммутационная износостойкость; $I_{т.с}$ — термическая стойкость.

Таблица 34.17. Временные параметры и токи обмоток контакторов переменного тока

Контактор		Ток обмотки, А						Собственное время, с	
Тип	Номинальный ток, А	в рабочем состоянии при напряжении, В			пусковой при напряжении, В			срабатывания	отпускания
		127	220	380	127	220	380		
КТ6000	100	—	0,21	0,14	—	2,1	1,4	0,03—0,04	0,02
	160	—	0,21	0,14	—	2,1	1,4	0,03—0,04	0,02
	250	1,3	0,72	0,44	13	7,4	4,4	0,04	0,012
	400	—	0,98	—	—	9,8	—	0,05	0,02
	630	—	1,65	0,98	—	16,5	9,8	0,05	0,02
КТ7000	100	—	0,26	0,12	—	2,5—3,7	1,2—1,8	0,34	0,015
	160	—	0,26	0,13	—	2,6—3,9	1,2—1,8	0,3	0,009
КНТ	10	0,123	0,07	0,0435	0,123	0,07	0,0435	0,6	0,4
	25	0,215	0,12	0,75	0,215	0,12	0,076	0,6	0,4
	60	0,4	0,21	0,126	2,3	1,22	0,126	0,6	0,4
	100	0,43	0,24	0,146	2,5	1,35	0,846	0,6	0,4
	200	0,6	0,35	0,2	3,12	1,78	1,0	0,6	0,6

Таблица 34.18. Допустимые токи контакторов КТ6000 для разных режимов работы, А

Тип	Повторно-кратковременный режим			
	Режим АС-3 (ПВ 40%, частота циклов 600 в час)		Режим АС-4 (ПВ 40%, частота циклов 1200 в час)	
	Ток включения при $U_{ном}$	Ток отключения при $0{,}17U_{ном}$	Ток включения при $U_{ном}$	Ток отключения при $0{,}17U_{ном}$
КТ6014	480	80	140	140
КТ6024	600	100	180	180
КТ6022	900	160	280	280
КТ6032	1500	250	450	450
КТ6042	2400	400	720	720
КТ6052	3800	630	1200	1200

Примечание. АС-3, АС-4 — режимы работы аппарата.

Таблица 34.19. Технические параметры трехполюсных контакторов бездуговых и с ограниченным дугообразованием

Контакторы	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Износостойкость механическая, циклы	Износостойкость коммутационная, циклы	Коммутационная способность, А	Частота срабатываний, циклы/ч	Габариты, мм	Масса, кг
Бездуговые:								
БКБ	100	380	10^7	10^7	2000	2000	380×260×366	16
МК2—20Е	63	380	—	—	—	1200	150×220×190	4,85
МК2—30Е	63	380	—	$3\cdot10^6$	1200	1200	150×220×186	5,25
МК3—30Е	100	660	—	$3\cdot10^6$	—	1200	150×220×186	5,25
КБК	250	660—1140	$1{,}6\cdot10^6$	—	3250—6900	1200	400×354×190	—
С ограниченным дугообразованием:								
КТ—6043БР	400	1140	$2{,}5\cdot10^6$	$0{,}5\cdot10^6$	600	300	550×345×530	—
Вакуумные:								
КТ12Р33, -37	160—630	660—1140	$5\cdot10^6$	$2\cdot10^6$	1750—8800	600—1200	238×80×188	18,5
КВДК-630	630	630	—	$2\cdot10^6$	—	—	271×224×214	—

В настоящее время перспективны бездуговые контакторы с полупроводниковой приставкой и вакуумные контакторы. В табл. 34.19 приведены некоторые параметры таких контакторов.

ПУСКАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Наиболее распространенные серии пускателей с контактной системой и электромагнитным приводом: ПМЕ, ПМА, ПА, ПВН, ПМЛ, ПВ, ПАЕ.

1. *Серия ПМЕ.* Это пускатели с прямоходовой магнитной системой и управлением на переменном токе. Напряжение от 36 до 500 В. Используются для управления электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Выпускаются в открытом, защищенном и пылебрызгонепроницаемом исполнениях, с тепловыми реле и без них, бывают реверсивными и иереверсивиыми.

Защищенное исполнение ПМЕ-031, -032, -051, -052, -081, -084, -121, -122, -123, -124, -221, -222, -223, -224; пылебрызгонепроницаемое исполненне ПМЕ-061, -062, -091, -092, -093, -094, -131, -132, -133, -134, -231, -232, -233, -234; нечетные — без теплового реле; четные — с тепловым реле. Пускатели серии ПМЕ-200, а также ПМЕ-111Т, ПМЕ-113Т имеют тропическое исполнение. В табл. 34.20 и 34.21 представлены технические параметры и габаритные размеры для типов пускателей этой серии.

Износостойкость и частота включений для пускателей ПМЕ-200:

Механическая, циклы . . . . . 10^7
Коммутационная, циклы . . . . . $2\cdot10^6$
Частота включений при
ПВ 70 % 600

Аналогичные значения для пускателей ПМЕ-111 и ПМЕ-113 — $5\cdot10^6$; $0{,}5\cdot10^6$ и 1200.

2. *Серия ПАЕ.* Пускатели с управлением на переменном токе: отдельные исполнения ПАЕ-313, -314, -411, -412 применяются преимущественно в станкостроении.

Таблица 34.20. Технические параметры пускателей серии ПМЕ и ПАЕ

Параметр	ПМЕ-000	ПМЕ-10	ПМЕ-200	ПАЕ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	3/1,5	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток, А, при напряжении 380 В и $\cos\varphi = 0{,}4$	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	2,4±0,4	2,5±0,5	3±0,5	2,2±0,5	3,2±0,5	4±0,5	4±0,5
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
Материал контактной накладки	Серебро	КМК-А30	КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10
Пусковая мощность, потребляемая обмоткой, В·А	65	130	160	260	465	800	3400
Номинальная мощность обмотки, В·А	3,6	6	8	17	20	26	38
Масса, кг	0,33	0,64	0,65	2,66	4,3	7,6	10,3

Пускатели ПАЕ имеют ряд исполнений: открытое ПАЕ-310 и -410; защищенное ПАЕ-320 и -420; нереверсивное ПАЕ-301 и -401; нереверсивное с тепловой защитой ПАЕ-302, -402; реверсивное без тепловой защиты ПАЕ-303 и -403; реверсивное с тепловой защитой ПАЕ-304, -404, -500 и -600.

В пускателях ПАЕ-300 для тепловой защиты применяются тепловые реле ТРН-40, в пускателях ПАЕ-400, -500 и -600 — реле ТРН.

Таблица 34.21. Конструктивные параметры пускателей серии ПМЕ и ПАЕ

Тип	Номинальный ток, А, при напряжениях 380/500 В	Количество контактов		Габаритные размеры, мм	Наличие теплового реле
		замыкающих	размыкающих		
ПМЕ-001	3/1,5	1	4	75×65×119	Нет
ПМЕ-002	3/1,5	1	4	121×83×101	Есть
ПМЕ-003	3/1,5	1	4	90×150×118	Нет
ПМЕ-004	3/1,5	2	2	135×150×118	Есть
ПМЕ-111	10/6	2	2	68×85×84	Нет
ПМЕ-112	10/6	4	4	154×102×91	Есть
ПМЕ-113	10/6	4	4	164×90×106	Нет
ПМЕ-114	10/6	2	2	232×90×107	Есть
ПМЕ-211	25/14	2	2	102×90×118	Нет
ПМЕ-212	25/14	4	4	195×98×126	Есть
ПМЕ-213	25/14	4	4	130×205×155	Нет
ПМЕ-214	25/14	2	2	180×205×155	Есть
ПАЕ-311	40/21	2	2	214×114×144	Нет
ПАЕ-312	40/21	4	2	275×114×121	Есть
ПАЕ-313	40/21	4	2	214×239×114	Нет
ПАЕ-314	40/21	2	2	264×239×121	Есть
ПАЕ-411	63/35	2	2	290×182×135	Нет
ПАЕ-412	63/35	4	2	290×183×135	Есть
ПАЕ-413	63/35	4	2	275×343×135	Нет
ПАЕ-414	63/35	2	2	275×343×135	Есть
ПАЕ-511	110/61	4^2	2	335×200×156	Нет
ПАЕ-512	110/61	4	2	335×200×156	Есть
ПАЕ-513	110/61	2^4	2	320×338×170	Нет
ПАЕ-514	110/61	2	2	320×338×170	Есть
ПАЕ-611	145/80	4^2	2	380×230×190	Нет
ПАЕ-612	146/80	4	2	380×230×190	Есть
ПАЕ-613	146/80	4	2	285×435×190	Нет
ПАЕ-614	146/80	4	2	385×435×190	Есть

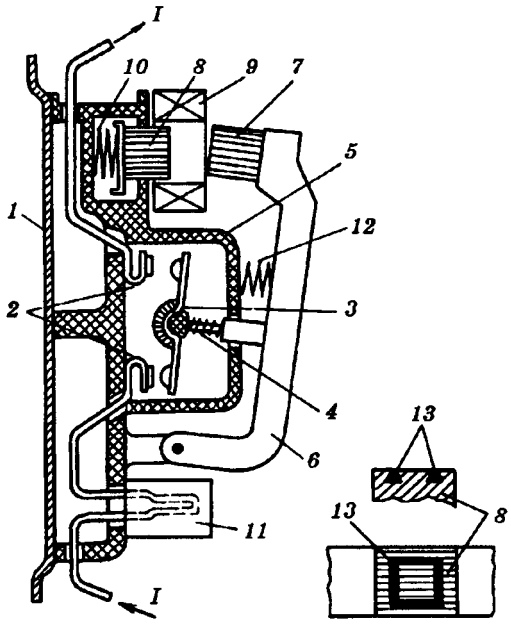


Рис. 34.7. Конструктивная схема пускателя ПАЕ

1 — металлическое основание; *2* и *3* — неподвижные и подвижные мостиковые контакты; *4* — контактная пружина; *5* — закрытая дугогасительная камера; *6* — траверса; *7*, *8* и *9* — якорь, катушка и магнитопровод электромагнита; *10* — амортизирующие пружины; *11* — тепловое реле; *12* — отключающая пружина; *13* — короткозамкнутый виток на магнитопроводе; *I* — коммутируемый ток

Таблица 34.22. Технические данные пускателей серии ПМА

Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Наибольшая мощность управляемого двигателя при 380 В, кВт	Габаритные размеры (высота × глубину × ширину), мм	Масса, кг
4	500	1,1	65×60×100	0,6
10	500	4,0	74×90×109	0,8
25	500, 660	10	90×98×115	1,1
40	500, 660	17	108×110×135	1,8
63	500, 660	30	120×120×158	2,6
100	500, 660	55	135×150×170	3,3
160	500, 660	75	160×170×200	5

Конструктивная схема пускателя ПАЕ дана на рис. 34.7. Технические данные некоторых типов пускателей этой серии имеются в табл. 34.21.

3. *Серия ПМА.* Пускатели предназначаются для управления асинхронными двигателями мощностью 1,1—75 кВт; имеют реверсивные и нереверсивные исполнения, с тепловым и без теплового реле, открытое и защищеиное исполнения; износостойкость механическая в аппаратах на ток до 63 А составляет $16 \cdot 10^6$, выше 63 А — 10^7 циклов; коммутационная — соответствеиио $3 \cdot 10^6$ и $2{,}5 \cdot 10^6$ циклов. Номинальный ток контактов вспомогательной цепи лежит в пределах от 4 до 10 А. В табл. 34.22 приведены технические данные пускателей ПМА.

Таблица 34.23. Технические показатели трехфазных тиристорных пускателей

Показатель	ПТ-16380-У5, ПТ-16380Р-У5	ПТ-40380-У5, ПТ-40380Р-У5	ПТК-100-380, БПК-1000	ПТУ-63-380
Назначение	Включение и отключение асинхронных двигателей	Включение, отключение и реверс асинхронных двигателей	Для коммутации и защиты от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз	Для коммутации и защиты от коротких замыканий и перегрузок
Номинальное напряжение, В	380	380	380	380
Номинальный ток, А	16	40	100	63
Ток включения, А	100÷130	200÷360	—	—
Ток отключения, А	16÷25	40÷63	—	—
Стойкость при сквозных токах, А:				
термическая (при 0,1 с)	400	900	—	—
электродинамическая	560	1650	—	—
Ток утечки, мА	20	20	20	20
Сопротивление изоляции в холодном состоянии, МОм	50	50	—	—
Коммутационная способность, А	400	900	1000	1700

4. *Серия ПМЛ.* Пускатели предназначены для управления асинхронными электродвигателями в повторно-кратковременном режиме и рассчитаны на номинальные токи 10, 25, 40 и 63 А (с управлением на постоянном токе). Механическая износостойкость не менее 16 млн срабатываний. Коммутационная износостойкость в категории применения АС-3 — 3 млн циклов на номинальный ток 10 А и 2 млн циклов на токи 25, 40 и 63 А.

Тиристорные пускатели используются как для дистанционного включения и отключения электрооборудования, так и для защиты от токов короткого замыкания и перегрузки.

В табл. 34.23 приведены технические данные отдельных серий этих аппаратов.

5. *Серия ПВ.* Пускатели предназначены для работы в трехфазных сетях переменного тока с изолированной нейтралью трансформатора на напряжение 660, 1140 В в угольных шахтах для управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Электромагнитные пускатели имеют взрывозащищенное исполнение и рассчитаны на номинальные токи 25, 63 и 250 А. Механическая износостойкость не менее 1,6 млн срабатываний. Коммутационная износостойкость в категории применения АС-3—0,5 млн циклов. Пускатели серии ПВ-1140 унифицированы с пускателями ПВИ-320 на напряжение 660 В. Взрывонепроницаемая оболочка пускателей имеет маркировку по взрывозащите РВ, ЗВ, И. Габаритные размеры пускателя ПВ-1140 870×850×980 мм при массе 410 кг.

34.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Автоматические выключатели (автоматы) снабжены расцепителями, которые срабатывают при возникновении аварийных режимов установки и механически воздействуют на удерживающий элемент аппарата. При срабатывании они освобождают его подвижную систему. Наиболее распространенные расцепители автоматов (по принципу действия) — это электромагнитные, тепловые и полупроводниковые [34.2, 34.3, 34.8].

НЕКОТОРЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Основные виды автоматических выключателей: универсальные, установочные, быстродействующие (ВАБ), гашения магнитного поля (АГП), защиты от утечек на землю. На рис. 34.8 дана принципиальная схема такого автомата. Характерные технические параметры автоматов серии АГП:

Номинальные токи, А	До 10 000
Номинальные напряжения, кВ	1—2
Число полюсов	2

Дугогасительная система — дугогасительная решетка с магнитным дутьем, обеспечивающая вращение дуг по пластинам.

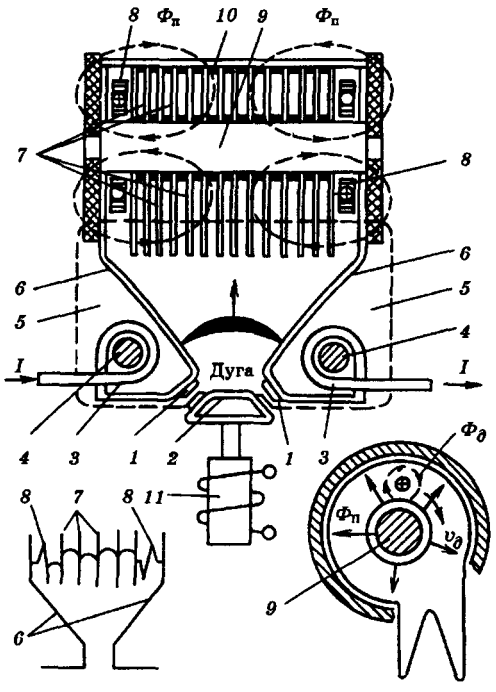


Рис. 34.8. Принципиальная схема автомата гашения магнитного поля АГП

1 и *2* — контакты; *3* — *5* — система магнитного дутья; *6* — дугогасительные рога; *7* — пластины дугогасительной решетки; *8* — катушки радиального магнитного поля; *9* и *10* — детали магнитопровода дугогасительной системы; *11* — приводной электромагнит; *I* — коммутируемый ток; $\Phi_п$, $\Phi_д$ — магнитные потоки; $v_д$ — скорость перемещения дуги

Блок защиты автомата от утечки на землю состоит из трансформатора нулевой последовательности и полупроводникового усилителя с блоком питания. Технические данные такого автомата серии АЕ2046-13Р на номинальное напряжение 380 В и ток 40 А таковы:

Кратность тока отсечки	12
Уставка защиты при однофазном замыкании на землю, мА	15
Время срабатывания, с	0,1
Время готовности к работе, с	0,2
Отключающая способность, кА	10
Износостойкость коммутационная, циклы	25 000
Износостойкость механическая, циклы	50 000

Наиболее распространенные серии универсальных и установочных автоматов:

1. *А3000.* Эта разновидность автоматов имеет много различных исполнений и является в сравнении с другими видами универсальных установочных аппаратов наиболее распространенной. Серия А3700 имеет токоограничивающее и селективное исполнения. В первом исполнении электродинамическое устройство обеспечивает быстрое размыкание контактов, образование дуги и ввод в отключаемую цепь сопротивления дуги. Во втором исполне-

нии используется устройство, компенсирующее электродинамические силы отталкивания контактов.

В табл. 34.24 приведены характерные исполнения автоматов А3000, в табл. 34.25 — технические параметры некоторых автоматов этой серии. На рис. 34.9 дан разрез автомата А3130, а на рис. 34.10 — защитные характеристики автоматов этой серии.

2. *Электрон.* Осуществляют защиту в сетях с постоянным напряжением до 440 и переменным 660 В. Устанавливаются в распределительных устройствах. Выпускаются с ручным, электромагнитным и электродвигательным приводами. Имеют по два или три главных полюса, по четыре замыкающихся и размыкающихся вспомогательных контакта. В табл. 34.26 приведены основные технические данные отдельных типов этого аппарата.

3. *АЕ-1000, АЕ-2000* предназначены для защиты электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий; имеют электромагнитные и комбинированные расцепители; допускают частоту оперативных переключений до 30 операций в час. В табл. 34.27 для нескольких типов автоматов АЕ-2000 приведены допустимые токи короткого замыкания.

4. *АП-50.* Кроме защиты от перегрузок и токов короткого замыкания, могут использоваться для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, если защитные характеристики электродвигателей соответствуют защитным характеристикам автомата. Выпускаются в пластмассовом корпусе (рис. 34.11).

5. *АК-50.* Назначение то же, что и у автомата АП-50. Выпускается в пластмассовом корпусе и дополнительном металлическом корпусе (брызгозащищенное исполнение). Более высокие значения пре-

Таблица 34.24. Технические характеристики автоматов серии А3000

Тип	Напряжение, В	Частота тока, Гц	Назначение, исполненне
А3100	220⎓, 500~	50	Защита от перегрузок и коротких замыканий, нечастые коммутации электрических цепей
А3100р	220⎓, 500~	50	Для судовых установок
А3100П	230⎓, 400~	50	Для передвижных установок
А3100/40	200⎓, 500~	50	Имеют клиновые контактные зажимы
А3100Т	400⎓, 500~	400 и 2500	—
А3100ПТ	230⎓, 400~	50	Тропическое исполнение, для передвижных электростанций и агрегатов
А3700	220⎓, 600~	50	Токоограничивающие и селективные; с полупроводниковыми максимальными расцепителями серии РП; допускают присоединение как медных, так и алюминиевых шин; имеют втычное исполнение

Таблица 34.25. Конструктивные параметры автоматов серии А3000

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Число полюсов	Возможность исполнения с расцепителем		Ток уставки расцепителя, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Габаритные размеры, мм	Примечание
				тепловым	электромагнитным		постоянный	переменный			
А3160	50	110 и 220	1, 2, 3	Есть	Нет	15÷50	1,6÷3,6	2,5÷4,5	0,025	158×105×89	—
А3110	110	220	2, 3	Нет	Есть	15÷100	5	2,5÷10	0,015	237×105×112	—
А3120	200	220	2, 3	Нет	Есть	15÷100	20	18	—	258×153×105	—
А3130	200	220	2, 3	Нет	Есть	100÷200	17÷28	14÷25	0,015	300×199×106	—
А3140	600	220	2, 3	Нет	Есть	250÷600	25÷50	32÷40	0,03	561×217×141	—
А3710Б÷ А3740Б	160÷ 630	440, 660	2, 3	Есть	Есть	—	110	40÷60	—	225×500×190	Токоограничивающий с полупроводниковыми или электромагнитными расцепителями — по заказам
А3710Ф+ А3730Ф	160÷ 630	220, 380	2, 3	Есть	Есть	—	25÷50	25÷50	—	225×400×140	Нетокоограничивающий с электромагнитным и тепловым расцепителями

Таблица 34.26 Данные автоматов "Электрон"

Показатель	Тип автомата				
	306 В	310 В	316 В	325 В	340 В
Номинальный ток, А	630	1000	1600	2500	5000
Коммутационная способность, кА	50	84	84	105	160
Габаритные размеры, мм	470×400×320	580×570×430	730×580×570	550×520×450	600×570×410

Таблица 34.27. Допустимые токи короткого замыкания для автоматов серии АЕ-2000, кА

Тип	Переменное напряжение, В		Постоянное напряжение, В	
	380	660	110	220
АЕ-2010	1÷5	—	2÷5	—
АЕ-2030	1÷5	1÷4	2÷5	2÷5
АЕ-2040	3,5÷10	3,5÷6,5	3,5÷10	3,5÷10

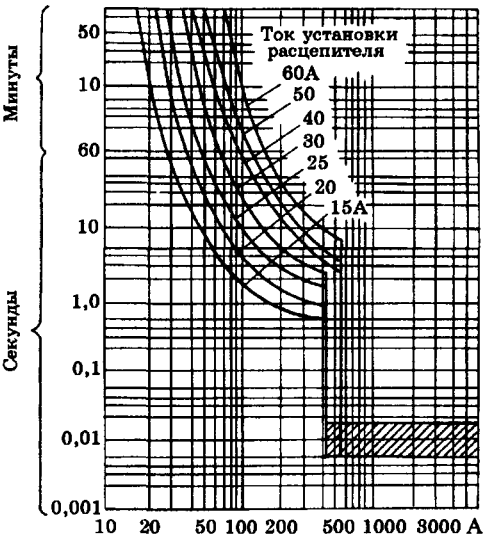


Рис. 34.10. Защитные характеристики автоматов А310 и А320

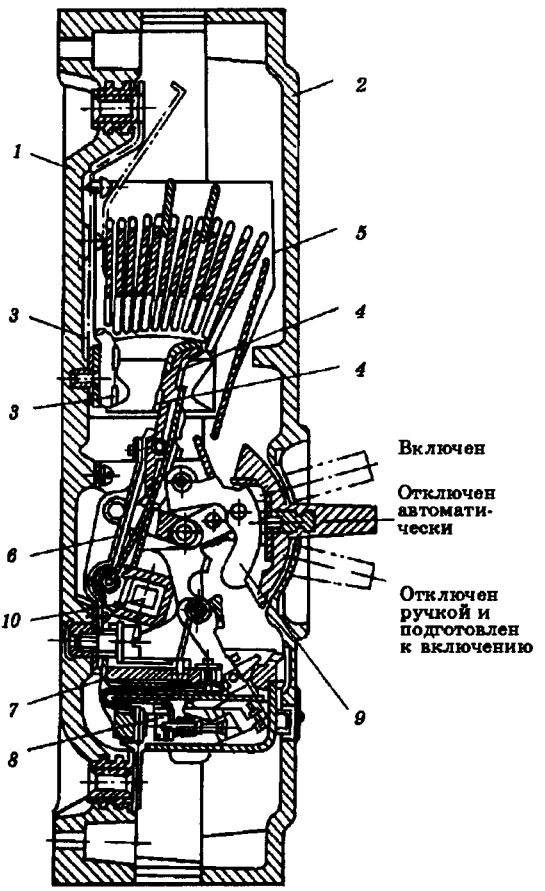


Рис. 34.9. Автомат А3130

1 — основание; *2* — изолирующий кожух; *3* и *4* — контактные накладки; *5* — дугогасительная решетка; *6* — гибкая токоведущая связь; *7* и *8* — узлы расцепителей; *9* — механизм свободного расцепления; *10* — вал

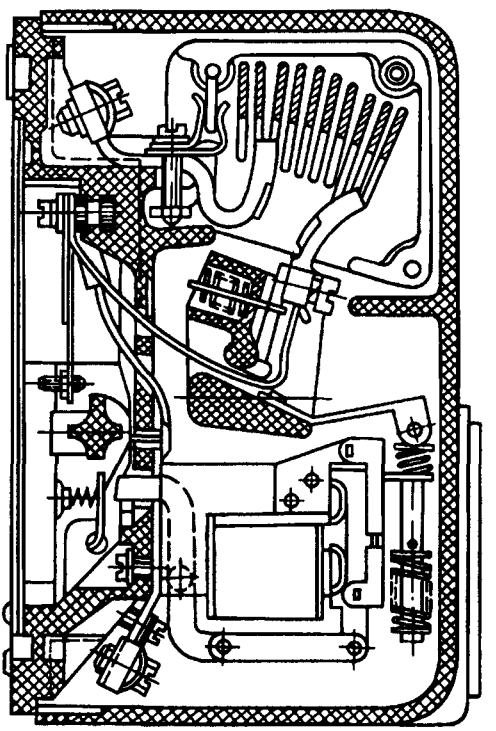


Рис. 34.11. Автомат АП50

Таблица 34.28. Параметры ряда автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Количество вспомогательных контактов		Возможность заказа с тепловым расцепителем
				замыкающих	размыкающих	
АК-63	63	200—400	2, 3	1	1	Есть
АК-50	50	320—400	2, 3	1, 2	1, 2	—
АП-50	50	220—500	2, 3	—	—	Есть
А-63	25	110—220	1	—	—	—
АЕ-1000	25	240	1	—	—	Есть
АЕ-2000	25, 63, 100	220—500	1, 2, 3	—	—	—
АС-25	25	220—380	2, 3	—	—	—
АВ-45/1000	6000	500	1	—	—	—
АСТ-2/3	25	380	2, 3	—	—	—

Окончание табл. 34.28

Тип	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, с	Привод	Габариты, мм
		постоянный	переменный			
АК-63	0,63—63	5	9	0,63	Ручной	145×68×124
АК-50	2—50	4,5	9	0,04	Ручной	113×81×117
АП-50	1,6—50	1,252	0,3—0,2	0,02	Ручной	210×160×143
А-63	0,63—26	2	2,5	—	Ручной	134×28×88
АЕ-1000	6—25	—	1,5	—	Ручной	90×21×77
АЕ-2000	—	10	16	—	Ручной	229×112×115
АС-25	1—20	3,2	2	—	Ручной	73×90×109
АВ-45/1000	—	—	—	—	Электродвигательный	1216×500×695
АСТ-2/3	—	90	—	0,08	Электромагнитный	120×75×95

дельного отключаемого тока в сравнении с АП-50 достигнуты в основном благодаря сдвоенной контактно-дугогасительной системе (на той и другой стороне мостикового контакта, вращающегося при срабатывании вокруг своего центра). Могут исполняться с электромагнитным расцепителем и гидравлическим замедлителем срабатывания, существуют исполнения на 50 и 400 Гц (например, АК-50-400-2МГ).

6. *А-63*. Используются для защиты от перегрузок и коротких замыканий. Исполнение однополюсное с электромагнитными токовыми расцепителями, с гидравлическим замедлителем срабатывания и без него. Имеют ручной привод, их масса около 0,25 кг, объем около 0,34 дм^3. Автомат допускает 50 000 циклов "включено-отключено", из них 6000 циклов при номинальном токе и напряжении.

7. *АВ-45-1/6000*. Автомат для защиты мощных сетей постоянного тока от коротких замыканий и перегрузок. Его коммутационная способность в пределе может доходить до 200 кА при напряжении 5000 В. В этих условиях отключения происходит разрушение некоторых частей автомата и он требует ремонта. Для исключения переброса дуги на металлические части других конструкций он должен располагаться на расстоянии не менее 2,5 см от них.

8. *АС-25* имеют морское и тропическое исполнение, могут работать в передвижных установках при вибрации и тряске.

Технические данные отдельных автоматов приведены в табл. 34.28. В табл. 34.29 даны параметры некоторых автоматических выключателей, а также некоторых других аппаратов на повышенные частоты.

9. *ВА50 и ВА75* рассчитаны на номинальные токи от 25 до 4000 А и предназначены для замены автоматов серий АЕ2000, А3700 и "Электрон". Автоматы выпускаются как в пластмассовом корпусе, так и в открытом исполнеиии номинальным напряжением 440 В постоянного и до 660 В переменного тока частотой 50 и 60 Гц. Предельная коммутационная способность достигает 160 кА (440 В постоянного тока) и 45 кА (660 В переменного тока).

Автоматы выпускаются неселективными с тепловыми й электромагнитными расцепителями макси-

Таблица 34.29 Технические характеристики аппаратов на повышенные частоты

Тип	Частота, Гц	Напряжение, В	Номинальный ток, А
	Автомат		
А-3123	400	380	15
А-3124	1100—1500	380	40
Р-3124	2400	500	80
	Контактор		
КНТ	400	380	10—200
К1000	2500 и 8000	800 и 1600	400—2400
КВ	1000—15 000	15—650	—

мального тока, селективными с полупроводниковыми расцепителями максимального тока.

Автоматы ВА47-38 и ВА47-43 предназначены для защиты силовых полупроводниковых приборов в преобразователях напряжением до 600 В постоянного тока и до 660 В переменного тока и относятся к классу быстродействующих. Собственное время отключения автоматов не зависит от токов короткого замыкания и не превышает 1,0 мс.

ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Конструктивные схемы некоторых распространенных разновидностей плавких предохранителей даны на рис. 34.12.

Давление, Па, внутри закрытого объема предохранителя постоянного тока можно оценить по формуле

$$p = 0{,}5LI_0^2/V,$$

где L — индуктивность отключаемой цепи, Гн; I_0 — отключаемый ток, А; V — внутренний объем предохранителя, м^3.

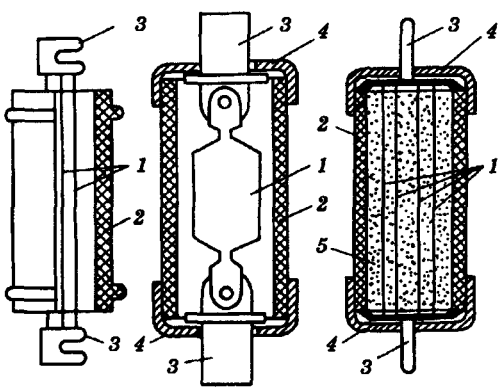


Рис. 34.12. Некоторые разновидности предохранителей

а — в открытой фарфоровой трубке; *б* — разборный; *в* — с наполнителем; *1* — плавкие вставки; *2* — изолирующая трубка; *3* — выводные детали; *4* — колпачки; *5* — наполнитель

Пограничный ток (минимальный ток срабатывания) открытого плавкого предохранителя в воздухе оценивается по формуле

$$I_п = \sqrt{\frac{\pi^2 K_т d^2 (T_{пл} - T_{окр})}{4\rho_0(1+\alpha T_{пл})}},$$

где $K_т$ — коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С); d — диаметр плавкой вставки, м; $T_{пл}$ — температура плавления материала вставки, °С; $T_{окр}$ — температура окружающей среды, °С; ρ_0 — удельное сопротивление вставки, Ом·м; α — температурный коэффициент сопротивления, °С$^{-1}$.

Пограничный ток засыпного предохранителя с наполнителем можно оценить по формуле

$$I_п = \pi d \sqrt{\frac{T_{пл} - T_{окр}}{2\rho_0(1+\alpha T_{пл})}} \times \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{8}{K_т D_н} + \frac{1}{\lambda_н}\ln\frac{D_н}{d} + \frac{1}{\lambda_т}\ln\frac{D_н}{D_в}\right)}},$$

где $D_в$ и $D_н$ — внутренний и наружный диаметр трубки, м; $\lambda_н$ и $\lambda_т$ — теплопроводность наполнителя и материала трубки, Вт/(м·°С); d — диаметр плавкой вставки.

Защитная (ампер-секундная) характеристика предохранителя приближенно рассчитывается по формулам:

а) открытая плавкая вставка в воздухе

$$t = (1{,}2 \div 1{,}3)\left(A' + \frac{A''}{3}\right)\frac{S^2}{I^2};$$

б) предохранитель с наполнителем

$$t = (1{,}7 \div 2{,}0)\left(A' + A''\right)\frac{S^2}{I^2},$$

где

$$A' = \frac{\gamma c}{\alpha \rho_0}\ln\frac{1+\alpha T_{пл}}{1+\alpha T_{нач}};$$

$$A'' = \frac{\gamma L_c}{\rho_{пл} - \rho_1}\ln\frac{\rho_{пл}}{\rho_1};$$

S — сечение вставки, м^2; I — ток, А; γ, c, L_c — плотность, кг/м^3, удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С), теплота плавления материала вставки, Дж/кг.

Удельные сопротивления материала вставки ρ_1 и $\rho_{пл}$ при температуре плавления и в расплавленном состоянии для некоторых материалов, 10^{-8} Ом·м:

Медь . . . . . $\rho_1 = 8{,}4$

. . . . . $\rho_{пл} = 20{,}4$

Серебро . . . . . $\rho_1 = 7{,}1$

. . . . . $\rho_{пл} = 18$

Цинк . . . . . $\rho_1 = 16$

. . . . . $\rho_{пл} = 35$

Свинец . . . . . $\rho_1 = 49$

. . . . . $\rho_{пл} = 94$

Условие селективности плавких предохранителей:

открытая вставка в воздухе:

$$\frac{S_1}{S_2} > \sqrt{(1{,}2 \div 1{,}3)\frac{3A'^2_2 + A''^2_2}{3A'_1}};$$

предохранитель с наполнителем:

$$\frac{S_1}{S_2} > \sqrt{(1{,}7 \div 2{,}0)\frac{A'^2_2 + A''^2_2}{A'_1}},$$

где индекс 1 относится к предохранителю, расположенному по схеме ближе к источнику питания, а индекс 2 — к более удаленному от источника, но последовательно соединенному с первым предохранителем.

В табл. 34.30 указаны области применения и номинальные параметры для ряда наиболее распространенных типов предохранителей, применяемых для защиты установок от токов короткого замыкания и перегрузки. В табл. 34.31 даны параметры предохранителей разборного типа ПР-2.

Таблица 34.30. Назначение и основные параметры блоков и панелей с предохранителями

Наименование	Назначение, применение	Основные параметры
Предохранители-разрядники	Защита от появления высокого потенциала при пробое изоляции	$U_{ном}$ до 500 В; пробивное напряжение от 350 до 1000 В
Рубильник-предохранитель РПП11	Неавтоматическое отключение цепей и защита от токов перегрузки и короткого замыкания	$I_{ном} = 80 \div 250$ А; $U_{ном} = 500$ и 220 В
Предохранитель-выключатель	То же	$I_{ном} = 100, 250$ А; $U_{ном} = 380$ и 220 В

Предохранители серии ПН2 с песчаным наполнителем выпускаются на номинальные токи от 40 до 1000 А и обладают высокой отключающей способностью — от 10 (при номинальном токе 1000 А) до 100 кА (при номинальном токе 40 А). Предохранители применяются для защиты промышленного электрооборудования в сетях напряжением 500 В переменного и 440 В постоянного тока.

Для защиты полупроводниковых установок от токов короткого замыкания и перегрузок широко применяются быстродействующие плавкие предохранители. Защитные характеристики предохранителей ПНБ с наполнителем приведены на рис. 34.13. Для отдельных типов быстродействующих предохранителей в табл. 34.32 даны их основные технические параметры и характеристики. Для предохранителя серии ПП51 на рис. 34.14 представлена зависимость времени срабатывания от отключаемого тока, а на рис. 34.15 — зависимость, характеризующая ограничение тока отключения предохранителем ПП51 при его работе.

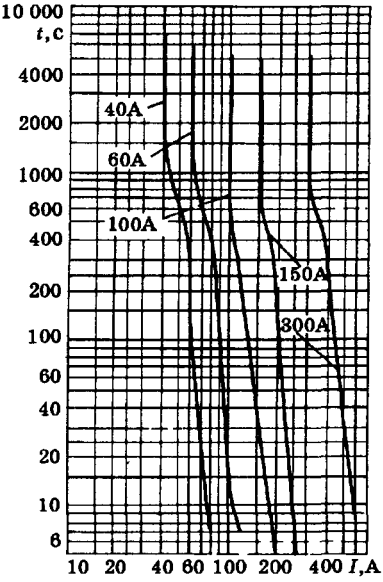


Рис. 34.13. Защитные характеристики предохранителей ПНБ при номинальных токах 40 — 300 А

Таблица 34.31. Параметры предохранителей типа ПР-2, 500 В

Тип	Номинальный ток, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный ток отключения, А, при напряжении		Габаритные размеры, мм
			380 В	500 В	
ПР-2-15	15	6; 10; 15	8000	7000	171×24,5×33
ПР-2-60	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	4500	3500	173×30,5×43
ПР-2-100	100	60; 80; 100	—	—	247×43×56
ПР-2-200	200	100; 125; 160; 200	11 000	10 000	296×56×76,5
ПР-2-350	350	200; 225; 260; 300; 350	13 000	11 000	346×72×100
ПР-2-600	600	350; 430; 500; 600	23 000	—	442×140×154
ПР-2-1000	1000	600; 1000; 850; 700	20 000	20 000	580×155×154

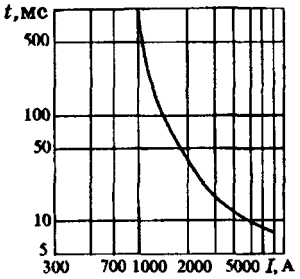


Рис. 34.14. Защитная характеристика быстродействующего предохранителя ПП51 на $I_{ном}$ = 400 А

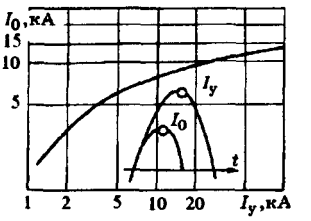


Рис. 34.15. Зависимость ограниченного тока отключения I_0 от установившегося тока короткого замыкания I_y при отключении предохранителей ПП51

Таблица 34.32. Технические параметры некоторых быстродействующих предохранителей

Тип	Ток, А	Напряжение, В	Интеграл квадрата тока, $А^2 \cdot с$	Предельный ток отключения, кА	Относительное перенапряжение
ППД12-43133	1600	150	1100	100	1,6
ППД12-40433	6300	450	3000	200	1,8
ПП51-3340354	160	380	10	—	—
ПП41	31÷630	760, 440	1350 при 630 А	100	1,5
ПП57-31	100	До 660	1,4	—	—
ПП57	250	До 660	1,3	—	—
ПП57-37	400	До 660	140	—	—
ПП57-39	630	До 1150	300	—	—
ПП57-40	800	До 1250	—	—	—
ПП71	550÷750	1300	—	40	1,5
ПП61	40÷160	380	100	100	1,5

34.5. КОМАНДОАППАРАТЫ, РУБИЛЬНИКИ, ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

К командоаппаратам относятся кнопки и ключи управления, путевые выключатели, контроллеры, командоконтроллеры и т.д.

В табл. 34.33 даны номинальные напряжения и токи, а также указаны особенности устройства наиболее распространенных видов командоаппаратов. Основные технические параметры и области применения некоторых отечественных контроллеров представлены в табл. 34.34. Данные по отечествен-

Таблица 34.33. Характеристики серий командоаппаратов

Вид аппарата	Тип	Напряжение, В	Ток, А	Особенности устройства и назначение
Командоконтроллер	КП-1000	500	10	Барабанный с кулачковыми шайбами, для дистанционного управления магнитными контроллерами и аппаратами крановых и металлургическнх приводов
Командоаппарат	КА21-17	380, 220	4	Кулачковый регулируемый с микропереключателями, для кузнечно-прессовых машии
Командоаппарат	КА11	30	0,5	На магнитоуправляемых контактах (герконах), для управления металлургическими установками
Командоаппарат	КА410А	500	До 16	Кулачковый регулируемый, для автоматизированных электроприводов
Кнопки и кнопочные посты	КУ-120	380, 220	4	Для дистанционного управления электромагнитными аппаратами
Командоаппарат	КА-4000	500, 400	До 15	Кулачковый регулируемый, для цепей управления дистанционными или автоматизированными электроприводами

Таблица 34.34. Технические характеристики типоисполнений контроллеров

Тип	Номинальные			Назначение, область применения
	ток, А	напряжение, В	мощность, кВт	
Магнитный ПСМ80	80	380	17,6	Управление трехфазными подъемными электромагнитами
Магнитные К и КС	—	380	1,4÷30	Крановые механизмы горизонтального передвижения и подъема
Магнитные Т и ТС (реечные)	—	220, 380	45÷80	То же
ППК	10÷63	500	—	Пакетно-кулачковые, для ручного управления короткозамкнутыми двигателями и переключений в цепях управления электроприводом
ККТ-60А	—	До 500	75	Крановые кулачковые, для управления крановыми двигателями и изменения схемы главной цепи
ЭКГ-8Ж с двигательным приводом	1300	3100	—	Переключение под нагрузкой ступеней вторичной обмотки трансформаторов на электровозах

ным выключателям и переключателям низкого напряжения содержатся в табл. 34.35.

Технические сведения по контактным путевым выключателям представлены в табл. 34.36. На рис. 34.16 изображен путевой выключатель ВПК 3000.

Технические параметры некоторых разновидностей рубильников, пакетных выключателей и переключателей-разъединителей низкого напряжения даны в табл. 34.37 и 34.38.

Таблица 34.35. Технические характеристики типов выключателей и переключателей

Виды аппаратов	Тип	Номинальные		Назначение, область применения
		напряжение, В	ток, А	
		Выключатели		
Микровыключатель	МП20	220~	4	Бытовые стиральные машины
	МП31	12÷40⎓	4	Цепи постоянного тока
Клавишный выключатель	ВК11	250~	6	Бытовые электроприборы
Выключатели реверсорные	ВРК-20	660~	160	Угольные комбайны и машины
		Переключатели		
Универсальные	ППГ-64	500~	15	—
Этажные	ЭП-ПУ3	380~, 220⎓	1,5	Лифты
Универсальные	ПУ-11	380~	6,25	Электронагревательные приборы
Клавишные	ПК12-23	250~	10÷16	Бытовые электромашины
Малогабаритные	ПМП	380~	10÷30	Радиоустройства
	ВКМ-В35	380~, 220⎓	2,5	Цепи управления электроприводами
	В23-140	220~	0,6	Ручной электроинструмент
Многопозиционные	ПМГ	24⎓	0,25	—
Кулачковые универсальные	ПКУ-3	220⎓, 500~	10	Схемы автоматики и электропривода
Открытые	ПЕ	220⎓, 500~	12	Управление электромагнитными аппаратами
Пакетно-кулачковые	ПКП, ПКВ	380~	10÷160	—

Таблица 34.36. Технические характеристики контактных путевых выключателей

Серия	Номинальные		Износостойкость, циклы		Рабочий угол поворота, град; ход, мм	Примечание
	напряжение, В	ток, А	механическая	электрическая		
ВК200, ВК300	380~, 220⎓	6,3	$5 \cdot 10^6$	10^6	12°	—
ВПК1000	380~, 220⎓	4	$1{,}6 \cdot 10^6$	10^6	15°; 1,7 мм	—
ВПК2000А	380~, 220⎓	6÷4	$10 \cdot 10^6$	$2{,}5 \cdot 10^6$	5,5÷8 мм	—
ВПК3000	500~, 200⎓	6	$6{,}3 \cdot 10^6$	—	12°	—
ВПК4000Д	500~, 220⎓	6÷4	$10 \cdot 10^6$	$2{,}5 \cdot 10^6$	5÷9 мм	—
КР-6200	345~, 220⎓	До 5	—	—	110°	—
КР-3200	380~, 440⎓	15	—	—	—	Конечный выключатель
КА4800Т	500~, 440⎓	10	$2{,}5 \cdot 10^6$	10^6	—	—
ВП-700	380	1	—	100	—	—
БПМ21	—	0,3÷0,6	10^7	10^6	0,5 мм	Блоки путевых микропереключателей

Таблица 34.37. Технические характеристики типов рубильников, пакетных выключателей, переключателей-разъединителей

Наименование	Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Число полюсов
			постоянный	переменный	
Рубильники-разъединители с приводом от маховика	Р2124/2	500⎓	800	800	2
	Р2344/2		1500	1500	2
	Р2523/2		300	2500	2
	Р2723/2		5000	4000	2
	Р2126/2		800	800	3
	Р2326/2		1500	1500	3
	Р2525/2		3000	2500	3
	Р2725/2		5000	4000	3
Пакетные выключатели	ПВМ1-10	220⎓,	6,3	4	1
	ПВМ2-10	380~	10	6,3	2
	ПВМ2-25		25	16	2
	ПВМ2-60		60	40	2
	ПВМ2-100		100	63	2
	ПВМ2-150		250	160	2
	ПВМ2-400		400	250	2
	ПВМ3-10		10	6,3	3
	ПВМ3-25		25	16	3
	ПВМ3-100		100	63	3
	ПВМ3-60		63	40	3
	ПВМ3-250		250	160	3
	ПВМ3-400		400	250	3
Переключатели-разъединители с центральной рукояткой	П11	380~, 220⎓	100	100	1
	П12		250	250	1
	П16		600	600	1
	П21		100	100	2
	П22		250	250	2
	П24		400	400	2
	П31		100	100	3
	П32		250	250	3
	П34		400	400	3
То же с центральным рычажным приводом	ППЦ-21	220⎓	250	250	2
	ППЦ-22		250	250	2
	ППЦ-24		400	400	2

Окончание табл. 34.37

Наименование	Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Число полюсов
			постоянный	переменный	
То же с центральным рычажным приводом	ППЦ-26	220⎓	600	600	2
	ППЦ-31		100	100	3
	ППЦ-32		250	250	3
	ППЦ-34		400	400	3
	ППЦ-36		600	600	3
Переключатели-разъединители с центральной рукояткой	П2111/2	380~,	800	800	1
	П2311/2	220⎓	1500	1500	1
	П2511/2		3000	2500	1
	П2711/2		500	4000	1
	П2113/2		800	800	2
	П2313/2		1500	1500	2
	П25/13/2		3000	2500	2
	П27/13/2		5000	4000	2
	П2115/2		800	800	3
	П2315/2		1500	1500	3
	П2515/2		3000	2500	3
Переключатели-разъединители с полюсным управлением (штангой)	П2541/2	380~,	3000	2500	1
	П2741/2	220⎓	5000	4000	1
	П2543/2		3000	2500	2
	П2743/2		5000	4000	2
	П2545/2		3000	2500	3
	П2745/2		5000	4000	3
Переключатели разъединители с приводом от маховика	П2124/2	380~,	800	800	2
	П2324/2	220⎓	1500	1500	2
	П2123/2		800	800	2
	П2323/2		1500	1500	2
	П2523/2		3000	2500	2
	П2723/2		5000	4000	2
	П2126/2		800	800	3
	П2326/2		1500	1500	3
	П2525/2		3000	2500	3
	П2725/2		5000	4000	3

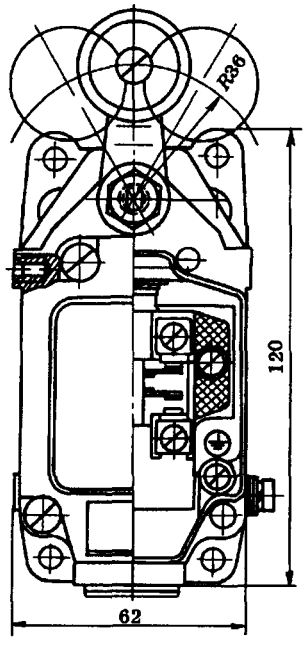


Рис. 34.16. Путевой выключатель ВПК3000

Таблица 34.38. Технические характеристики неавтоматических пакетных выключателей

Номинальный ток, А	Наибольшие отключаемые токи, А, при напряжении		Количество переключений (переменный ток при $\cos\varphi = 0{,}3$ или постоянный при $L/R = 0{,}01$ с)
	постоянном 220 В	переменном 380 В	
10	10	6	10 000
25	25	15	10 000
60	60	40	10 000
100	100	60	5000
150	150	100	5000
250	250	150	5000
400	400	250	5000

34.6. СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Строгой классификации силовых полупроводниковых аппаратов управления не существует. Традиционно к ним относятся полупроводниковые прерыватели электрической цепи на токи свыше 10 А, выполняющие функции статических контакторов и регуляторов параметров электрической энергии (пус-

корегулирующие и управляющие устройства в электроприводе, стабилизаторы напряжения и тока, регуляторы и компенсаторы реактивной мощности и др.).

Основными исполнительными элементами силовых полупроводниковых аппаратов являются тиристоры или силовые транзисторы, работающие в ключевых режимах. В отличие от электромеханических аппаратов полупроводниковые обладают более широкими функциональными возможностями, обусловленными способностью полупроводниковых элементов импульсно управлять потоком электрической энергии в широком диапазоне частот (для современных силовых полупроводниковых приборов этот диапазон соответствует 0÷100 кГц и более). Главными недостатками полупроводниковых аппаратов по сравнению с электромеханическими являются более высокое значение переходного (контактного) сопротивления для включенной цепи и более низкое для выключенной. Практически полупроводниковая коммутация не обеспечивает гальванической развязки электрических цепей.

ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕРЫВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Тиристорные прерыватели с естественной коммутацией. Большинство типов тиристорных прерывателей переменного тока выполняются на основе схемы двух встречновключенных тирнсторов $VS1$ и $VS2$ (рис. 34.17, *а*). Управление тиристорами осуществляется от системы управления *СУ*, нмеющей как правило, связи с внешним управлением, задающим режим работы прерывателя, и устройствами отображения информации *Инф* о его функционировании.

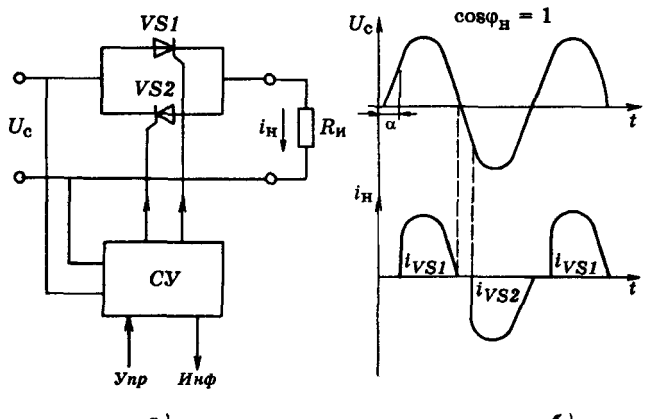
Принцип действия прерывателя основан на периодическом включении тиристоров $VS1$ и $VS2$ в моменты поступления на них импульсов управления. Моменты формирования импульсов управления синхронизированы с фазой переменного напряжения цепи, в которой установлены прерыватели. Выключение тиристоров обусловливается их естественной коммутацией в моменты, соответствующие уменьшению прямого тока тиристора до нуля под воздействием переменного напряжения силовой цепи.

В зависимости от реализуемых системой управления режимов работы прерыватель может выполнять функции статического контактора переменного тока или регулятора напряжения (тока) нагрузки $Z_н$. В многофазных цепях встречновключенные тиристоры включаются в каждую фазу, а устройства синхронизации, входящие в этом случае в состав *СУ*, обеспечивают требуемую фазировку формирования импульсов управления тиристорами каждой фазы.

При работе в режиме контактора каждый из тиристоров проводит ток нагрузки $i_н$ в течение половины периода $T/2$, соответствующего частоте питающей сети. При этом для обеспечения устойчивой работы контактора с нагрузкой, имеющей $\cos\varphi \neq 1$, длительность импульса управления должна быть не менее $\varphi_н/\omega$, где $\varphi_н$ — угол сдвига между напряжением и током нагрузки, а ω — частота переменного напряжения. Выключение контактора происходит при снятии (блокировке) импульсов управления тиристорами. В силу естественной коммутации тиристоров гарантированное время выключения контактора не может быть меньше $T/2$.

В режиме работы регулятора напряжения (тока) импульсы управления поступают на тиристоры со сдвигом относительно фазы переменного напряжения на угол управления α. Прн значении угла $\alpha \geq \varphi_н$ в цепи нагрузки возникает режим прерывистого тока (рис. 34.17, *б*). В результате с ростом угла управления α действующее и среднее значения напряжения (тока) уменьшаются. Функциональные возможности регулятора и закон регулирования определяются *СУ* регулятора, в которую вводятся сигналы необходимой информации от внешних датчиков.

Тиристорные прерыватели с принудительной коммутацией. Тиристорные прерыватели переменного тока с принудительной (искусственной) коммутацией преимущественно используются в качестве быстродействующих контакторов переменного



а) *б)*

Рис. 34.17. Тирнсториый прерыватель с естественной коммутацией

а — схема; *б* — диаграммы напряжения и тока

тока. Топология схем соединения основных тиристоров при этом сохраняется такой же, как и схем с естественной коммутацией, но при этом дополнительно в силовую схему вводятся устройства, обеспечивающие принудительное в любой заданный *СУ* момент времени выключение основных тиристоров. Наибольшее распространение в качестве таких устройств получили *LC*-контуры, подключаемые к основным тиристорам посредством вспомогательных тиристоров, не участвующих в проводимости тока нагрузки при включенном состоянии контактора. Вариант типовой схемы такого тиристорного прерывателя, работающего в режиме контактора, представлен на рис. 34.18, *а*. Когда контактор включен, ток нагрузки протекает в один полупериод через тиристор *VS1* и диод *VD1*, а в другой — через тиристор *VS2* и диод *VD2*. Коммутирующий конденсатор $C_к$ заряжен от маломощного зарядного устройства *ЗУ* до напряжения $U_{Cкm}$ (рис. 34.18, *б*) с полярностью, указанной на рис. 34.18, *а*, и отделен от основных тиристоров и диодов выключенным тиристором *VS3*.

Импульсы управления тиристорами формируются *СУ*, так же как и в контакторах с естественной коммутацией.

Выключение контактора происходит по внешней команде, вызывающей формирование *СУ* импульса управления тиристором *VS3* и его включение. В результате возникает контур разряда конденсатора с током $i_к$, направленным встречно току проводящего в тот момент тиристора. Например, если ток нагрузки проводил тиристор *VS1*, то при включении в момент $t = t_0$ (рис. 34.18, *б*) тиристора *VS3* разрядный ток $i_к$ конденсатора $C_к$ будет протекать по контуру *VS3—VS1—VD3—*$C_к$*—*$L_п$*—VS3*. Наличие в контуре реактора $L_к$ обусловливает колебательный характер разрядного процесса, при котором ток $i_к$ изменяется по синусоидальному закону с частотой, близкой к резонансной частоте $\omega_0 = 1/L_кC_к$ контура $L_кC_к$. При этом через тиристор *VS1* будет протекать разность токов нагрузки и контура $i_н - i_к$. В момент $t = t_1$ ток в тиристоре *VS1* становится равным нулю и он выключается, а диод *VD2* под воздействием прямого напряжения включается. Так как резонансная частота контура ω_0 обычно значительно превышает частоту тока нагрузки $i_н$, значение последнего на интервале коммутации практически не изменяется (рис. 34.18, *б*). Поэтому, начиная с момента $t = t_1$ разность токов $i_н - i_к$, которой соответствует вся штрихованная зона на рис. 34.18, *б*, протекает через диод *VD2* до момента $t = t_2$, когда значение тока $i_к$ снова становится меньше значения тока $i_н$ и диод *VD2* выключается. На интервале проводимости диода *VD2* ($t_1 \div t_2$) к тиристору *US1* будет приложено обратное напряжение, значение которого соответствует значению прямого напряжения на диоде *VD2*. После выключения диода *VD2*, ток нагрузки $i_н$ начинает протекать по контуру: *VD3—*$C_к$*—*$L_к$*—VS3—VD1—*$Z_н$*—*источник питания (сеть) — *VD3*. При этом процесс изменения тока в указанном контуре зависит от параметров нагрузки. В случае низкоомной активной или скомпенсированной конденсатором емкостью $C_н >> C_к$ активно-индуктивной нагрузки процесс изменения тока $i_н$ будет оставаться колебательным с частотой, близкой к ω_0. В результате в момент $t = t_3$ (рис. 34.18, *б*) будет происходить выключение тиристора *VS3*, т.е. полное отключение контактором нагрузки от источнника переменного напряжения. В этом случае время выключения контактора $t_{выкл}$ может быть оценено по следующему приближенному соотношению:

$$t_{выкл} \approx t_{VS3}^{вкл} + \pi\sqrt{L_кC_к},$$

где $t_{VS3}^{вкл}$ — время включения тиристора *VS3*.

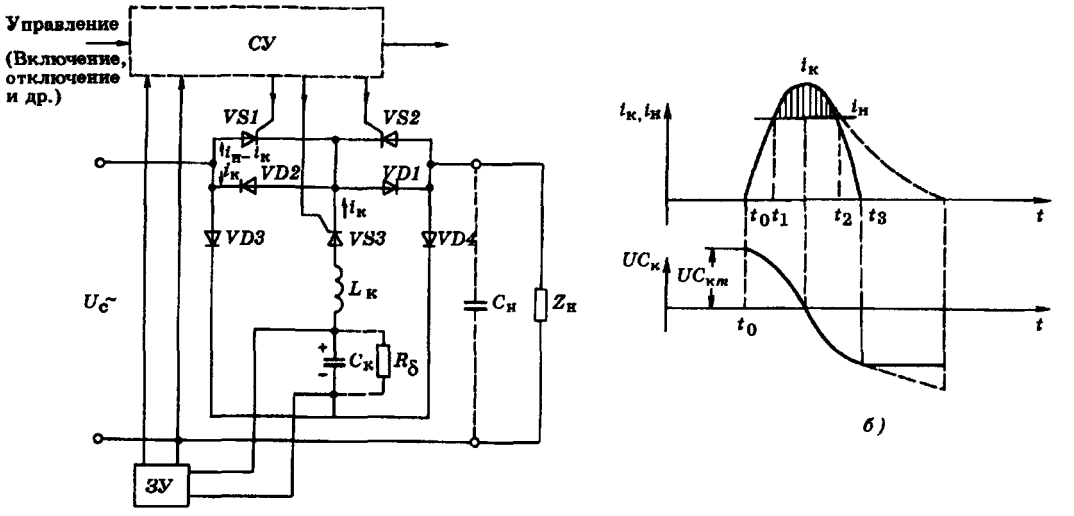


Рис. 34.18. Тиристорный прерыватель с принудительной коммутацией
а — схема; б — диаграммы тока и напряжения на интервале коммутации

При активной нагрузке $R_н > \frac{2}{\sqrt{L_к C_к}}$ процесс, начиная с момента $t = t_2$ становится апериодическим и момент выключения затягивается до уменьшения тока $i_н$ ниже значения удерживающего тока тиристора *VS3*. Если нагрузка активно-индуктивная, то выключение контактора также происходит позже момента $t = t_3$ вследствие изменения параметров схемы контура, в котором начинает протекать ток нагрузки после момента $t = t_2$. При этом значительная часть энергии, запасенной в индуктивности нагрузки $L_н$, переходит в конденсатор $C_к$, вызывая перенапряжение на нем обратной (исходному состоянию) полярности. Значение перенапряжения на конденсаторе $C_к$ можно снизить введением в схему энергопоглотительного сопротивления $R_д$ (рис. 34.18, *а*) или исключить полностью посредством компенсации индуктивной составляющей конденсатором $C_н$. Следует отметить, что проблема компенсации не возникает при использованнн таких контакторов в системах бесперебойного электроснабжения, когда контакторы используются для отключения одного из параллельно работающих генераторов от общих шин нагрузки.

В течение временн $t_1 \div t_2$ тиристоры и контакторы восстанавливают свою запирающую способность. Для гарантированного выключения основных тиристоров длительность интервала $t_2 \div t_1$ должна превышать паспортное значение времени выключения тиристоров t_q при максимальном допустимом характеристиками контактора токе коммутируемой нагрузки. Для рассматриваемой схемы рекомендуется выбирать следующие параметры колебательного контура:

$$C_к = \frac{3 I_{нт} K_{зап} t_q}{\pi U_{C_{кт}}};$$

$$L_к = \frac{3 U_{C_{кт}} K_{зап} t_q}{4\pi I_{нт}},$$

где $K_{зап}$ — коэффициент запаса, значение которого принимается обычно равным 2÷3; $U_{C_{кт}}$, $I_{нт}$ — максимальные значения напряжения на конденсаторе $C_к$ и отключаемого тока.

Для быстродействующих контакторов переменного тока, выполненных на неполностью управляемых ключевых элементах, например запираемых тиристорах, необходимость в устройствах принудительной коммутации отпадает. Однако главная проблема — отвод при выключении энергии накопленной в индуктивностях нагрузки, сохраняется. Одним из путей решения этой проблемы является использование конденсаторных энергопоглотителей, компенсирующих и инвертирующих устройств.

В качестве регулирующих устройств тиристорные прерыватели переменного тока с принудительной коммутацией могут использоваться, так же как и тиристорные прерыватели с естественной коммутацией, посредством фазового регулирования моментов включения основных тиристоров в режиме, соответствующем включенному состоянию контактора. Но вероятность принудительного выключения создает для этого класса схем возможности регулирования на более высоких частотах сравнительно с частотой сети, в которой они установлены. Реализация этой возможности определяется схемотехникой и элементной базой прерывателя. Так, например, использование запираемых тиристоров существенно упрощает решение задачи регулирования на более высоких частотах в целях уменьшения искажений сетевого тока путем высокочастотной синусоидальной модуляции в процессе регулирования.

Отечественной промышленностью в настоящее время разработаны серии тиристорных контакторов с естественной коммутацией типов ТКЕО-250/380 для коммутацин линий нагрузки и ТКЕП-100/380 для переключения нагрузки. Основные технические параметры этих аппаратов приведены в табл. 34.39.

Таблица 34.39. Основные параметры тиристорных контакторов с естественной коммутацией

Параметр	Тип	
	ТКЕО-250/380	ТКЕП-100/380
Номинальное напряжение, В	380	380
Допускаемые отклонения напряжения питания сети, %	±25	±25
Номинальная частота питания сети, Гц	50; 60	50; 60
Дополнительное отклонение частоты питания сети, %	±5	±5
Число фаз питающей сетн	3	3
Номинальный ток, А	250	100
Допустимая длительность перегрузки при значеннях тока:		
1,1 $I_{ном}$, мин, не более	120	120
1,2 $I_{ном}$, мин, не более	60	60
1,6 $I_{ном}$, мин, не более	1	1
Время отключения ТКЕО (переключения ТКЕП), мс, не более	20	5 (синфазный режим нли превышение напряжения), 15 (несинфазный режим)
Время автоматического повторного включения (АПВ) после срабатывания защиты по току, мс	100÷500	—
Потери мощности, %, не более	2	2

Тиристорные контакторы с принудительной (искусственной) коммутацией ТКИ выпускаются в составе агрегатов бесперебойного питания (АБП). Номинальные токи ТКИ: 50, 100 и 200 А, время срабатывания не превышает 1 мс, а максимальное значение переключаемого тока составляет до $5I_{ном}$.

На основе тиристорных прерывателей разработан ряд бесконтактных устройств для управления электроприводом.

Переключатели тиристорные маломощные серии ПТМ предназначены для включения, реверса, отключения, динамического торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 5 кВт, для бесконтактного управления электромагнитами и другими нагрузками постоянного и переменного тока. Основные технические параметры ПТМ: время включения не более 10 мс, время отключения не более 15 мс при работе на активную нагрузку (для ПТМ переменного тока частотой 50 Гц); параметры нагрузки: переменный ток 1,6; 3 и 10 А, до 440 В; 50, 60 и 400 Гц; постоянный ток 3 А; 24÷48 и 110÷220 В. Размеры ПТМ 90×55×57 мм (90×55×78 мм — ПТМ-1).

Пускорегулирующие бесконтактные устройства серии ПРБУ применяются для пуска, реверса, торможения и бесступенчатого регулирования скорости асинхронных электродвигателей серий АК, МТ, МТВ, МТМ мощностью до 100 кВт.

Пусковые тиристорные устройства серии ПТУ предназначены для включения и отключения трехфазных асинхронных двигателей, активных и активно-индуктивных нагрузок. Номинальный ток 63, 100, 160 и 250 А.

Станции управления типов БУ, ШУ предназначены для управления электродвигателями постоянного тока мощностью от 5,75 до 160 кВт.

Станции управления типа ТСУ предназначены для управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором мощностью до 40 кВт.

СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕРЫВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Упрощенная структурная схема прерывателя постоянного тока представлена на рис. 34.19. Функции ключа *S* могут выполнять различные виды силовых полупроводниковых элементов, работающих в ключевом режиме: силовые транзисторы, обычные и запираемые тиристоры и др. При использовании ключевых элементов с неполной управляемостью, например обычных тиристоров, их выключение обеспечивается посредством принудительной коммутации. Моменты включения и отключения ключевого элемента *S* определяются системой управления *СУ*, имеющей связь с устройствами внешнего управления режимами работы *Упр* и отображения информации о функционировании прерывателя *Инф*. Для работы прерывателя на активно-индуктивную нагрузку в схеме предусматривается обратный диод *VD*, который при выключении ключа *S* под воздействием ЭДС самоиндукции нагрузки включается и замыкает на себя ток $i_н$ (рис. 34.19, *б*).

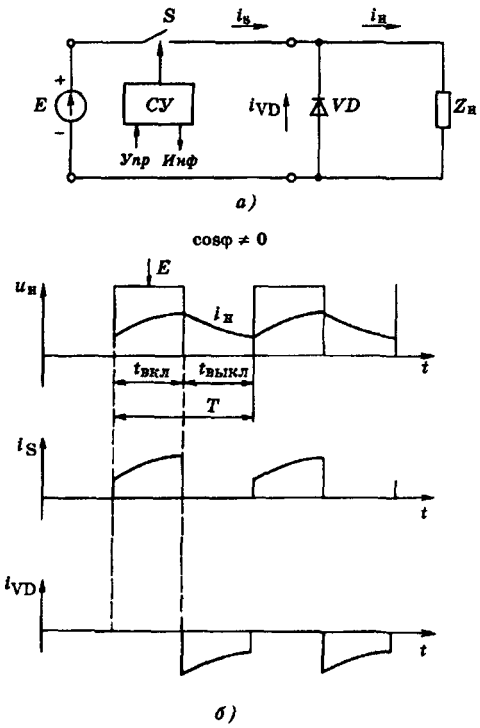


Рис. 34.19. Прерыватель постоянного тока
а — обобщенная схема; *б* — диаграммы тока и напряжения

Прерыватель постоянного тока, так же как и переменного, может выполнять функции контактора или регулятора напряжения (тока) нагрузки $Z_н$. В качестве регулятора прерыватель, схема которого изображена на рис. 34.19, *а*, является представителем широкого класса преобразователей постоянного тока в постоянный, имеющих различное схемотехническое исполненне. В этом аспекте он классифицируется как последовательный ключевой преобразователь постоянного тока с импульсным регулнрованием. В зависимостн от выполняемых функций закон импульсного управления может быть различным: широтно-импульсная модуляцня (ШИМ), частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) и др. Диапазон регулирования выходного напряжения имеет граннцы от *E* до нуля. Частота регулнрования определяется элементной базой и для силовых транзисторных регуляторов (на токи свыше 10 А) может быть в зависимости от типа транзисторов, выше 100 кГц, а для тиристорных — до 15 кГц.

Возможности управления в регуляторе, выполненном по схеме на рнс. 34.19, *а*, ограничены однополярной модуляцией напряжения. Использование полностью управляемых ключей, например запираемых тиристоров, позволяет на основе топологии четырехквадрантного преобразователя реализовывать управляющие устройства постоянного тока с двухполярной модуляцией и рекуперацией энергии в первичный источник. Это существенно расширяет возможности управления в случае нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер· электромаг-

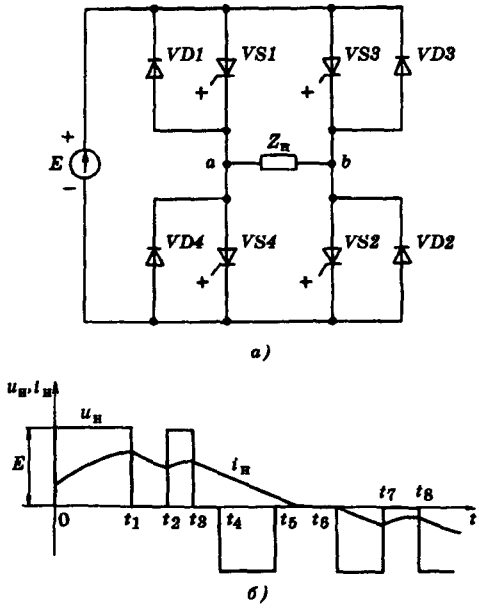


Рис. 34.20. Четырехквадрантный преобразователь
а — схема; *б* — диаграммы напряжения и тока

ниты, компоненты электропривода и др. Силовая схема управляющего устройства выполнена на четырех полностью управляемых ключевых элементах *VS1*+VS4, соединенных со встречновключенными диодами *VD1*+*VD4* (рис. 34.20, *а*). Любая пара ключевых элементов *VS1*, *VS2* или *VS3*, *VS4* может работать в режиме частотной модуляции постоянного тока аналогично прерывателю на рис. 34.19, *а*, формируя на нагрузке $i_н$ однополярные импульсы напряжения с амплитудой *E* (рис. 34.20, *б*). Длительность импульсов и моменты применения полярности определяются законом управления. Рекуперация энергии, накопленной в ннндуктивностях нагрузки $Z_н$, осуществляется через диоды *VD*÷*1* +*VD4*. *Так, например, если на интервалах* 0—t_1 *и* t_2—t_3 *включены тиристоры VS1* и *VS2*, то на интервалах t_1+t_2 и t_3+t_4 тиристор *VS2* выключен и ток нагрузки $i_н$ проводят тиристор *VS1* и диод *VD3*, формируя в нагрузке паузу с нулевым напряжением. На интервале t_4÷t_5 тиристор *VS1* выключается, и происходит возврат энергии индуктивности нагрузки $Z_н$ в источник питания через диоды *VD3* и *VD4*, а на ннтервалах с $t = t_5$ до $t = t_6$ ток опять протекает через тирнстор *VS1* н днод *VD3*. Затем после прохождения тока $i_н$ через нуль ($t = t_6$) модуляция напряжения на нагрузке осуществляется тиристорами *VS3* и *VS4*.

34.7. ГИБРИДНЫЕ АППАРАТЫ

Гибридными, или комбинированными, аппаратами управления называются электрические аппараты, в которых во включенном состоянии ток в основном проходит через электромеханические контакты, а коммутация осуществляется силовыми полупроводниковыми элементами. Сочетание электромеханических контактов с электронными приборами позволяет повысить скорость коммутации, исключив при этом частично илн полностью появление дуги, и одновременно уменьшить тепловыделение во включенном состоянии за счет шунтирования полупроводниковых $p-n$-переходов металлическим контактом с малым контактным сопротивлением. Гибридные аппараты отличаются коммутационной износостойкостью и уменьшенными массогабаритами по сравнению с электромеханическими. Кроме того, они обладают более широкими функциональными возможностями, так как полупроводниковые элементы могут использоваться для регулирования напряжения (тока) в переходных режимах по заданной системой управления программе.

В качестве электронных ключевых компонентов в современных гибридных аппаратах используются преимущественно тиристоры. При этом, как правило, применяется их естественная коммутация. В контакторах и выключателях переменного тока главные контакты *ГК* шунтируются встречно соединенными тиристорами *VS1* и *VS2* обычно через вспомогательный контакт *ВК* (рис. 34.21, *а*). Прн включении контактора последовательно включаются: вспомогательный контакт *ВК*, один из тиристоров (в зависимости от полярности мгновенного значения напряжения) и *ГК*. В *ГК*, проводящий тиристор вы-

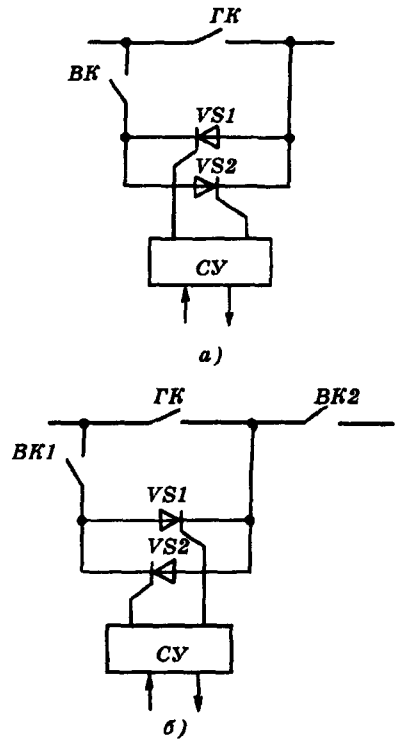


Рис. 34.21. Обобщенные схемы гибридных контакторов переменного тока на основе тиристоров
а — схема контактора без гальванической развязки; *б* — схема контактора с гальваннческой развязкой

ключается, и ток нагрузки переходит в *ГК* без возникновения дуги. При отключении размыкание *ГК* вызывает процесс восстановления на нем напряжения, значение которого до начала развития дуги оказывается достаточным для включения соответствующего тиристора и перевода в него тока нагрузкн. При прохожденин тока через нуль происходит естественная коммутация тиристора, находящегося в проводящем состоянии, и затем размыкание *ВК*.

Для обеспечения гальванической развязки нагрузки от источника в схему контактора вводят дополнительный вспомогательный контакт *ВК2* (рис. 34.21, *б*). В целях бездуговой коммутации контакт *ВК2* должен замыкаться до включения *ВК1* и размыкаться после отключения *ГК* и тиристора *VS1*(*VS2*).

Управление тиристорами гибридного аппарата в общем случае осуществляется системой управления *СУ*, схемотехника которой определяется функциями аппарата. Для выполнения простейших функций — включения н отключения — *СУ* может быть реализована на основе нескольких элементов без использования отдельных нсточников питания и типовых функцнональных узлов электронной автоматики.

На рис. 34.22, *а* представлена схема гибридного аппарата, *СУ* которого состоит из контакта *ВК*, резистора *R1* и двух диодов *VD1*, *VD2*. Функции *ВК* для повышения надежности могут выполнять герконы, обладающие высокой износостойкостью. Электромеханический контакт *ВК* может быть исключен из *СУ* без ее значительного усложнения, посредством использования трансформатора тока. Так, например, в гибридных контакторах серии КТ управление тиристорами осуществляется по схеме с трансформатором тока *ТТ*, включенным последовательно с *ГК* (рис. 34.22, *б*). Включение тиристоров *VS1* и *VS2* происходит под воздействием напряжения, формирующегося на вторичных обмотках трансформатора при замыкании и размыкании *ГК* [34.11]. Если гибридный аппарат должен выполнять функции также и регулятора, как, например, в пускорегулирующих устройствах, то *СУ* значнтельно усложняется, так как закон регулирования реалнзуется посредством формирования определенной последовательностн нмпульсов управления тиристорами. Как и в тиристорных регуляторах переменного тока, для этой цели обычно применяется способ фазового регулирования.

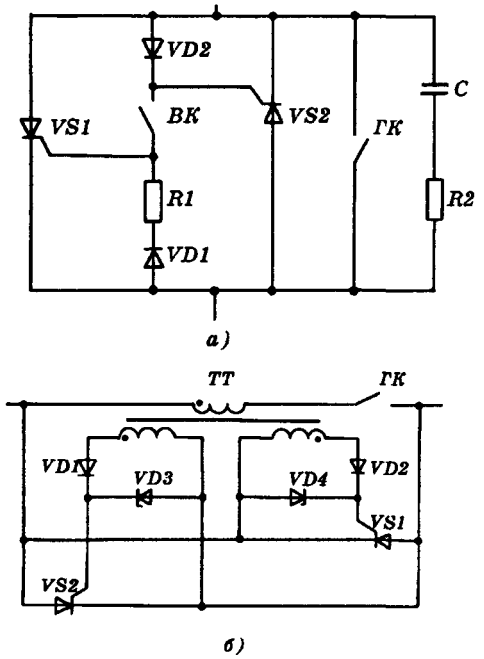


Рис. 34.22. Схемы управления тиристорами гибридных аппаратов

а — схема на основе вспомогательного электромеханического контакта; *б* — схема на основе трансформатора тока

В настоящее время промышленностью разработаны гибридные контакторы тнпов КТ64, КТП64, КТ65, КТП65, МК-2 с полупроводниковыми блоками. В контакторах типа КТ применяется электромагнитный привод переменного тока, а в КТП — постоянного тока. Основные технические характеристнкн контакторов приведены в табл. 34.40.

Контакторы типа МК-2 имеют двух и трехполюсное исполнение и габариты соответственно 142×202×185 и 145×202×185 мм, массу соответственно 4,85 и 5,3 кг. Коммутационная износостойкость контакторов при номннальном рабочем токе $I_{ном.р} = 0{,}6I_{ном}$, где $I_{ном} = 63$ А, при частоте включений 1200 в час составляет 5 млн циклов, механическая нзносостойкость — 16 млн циклов. Номинальные напряжения 380 и 660 В. Время отключения не более 0,07 с. Контакторы МК-2 могут быть также применены на номинальный ток 160 А при снижении $I_{ном.р}$.

Принуднтельная коммутация тиристоров обычно нспользуется в гибридных переключателях для систем бесперебойного электропитания. В таких системах переключатель должен обеспечить перевод питания нагрузкн с основного источника *ОИ* на резервный источник *РИ* за минимальное время (рис. 34.23). В переключателях с принудительной коммутацией возможно получить меньшее время переключения, чем при естественной коммутацин тиристоров. Схемотехника устройств принудительной коммутации в гибридных переключателях и тиристорных контакторах одинакова. Отличительной особенностью является то, что в гибридных переключателях формн-

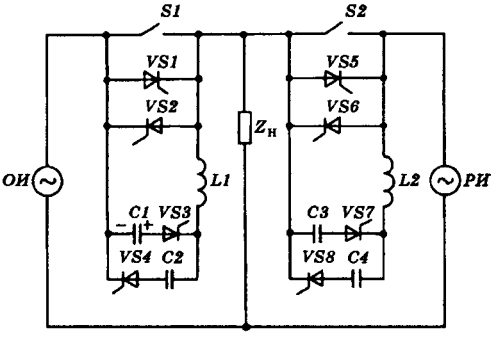


Рис. 34.23. Тиристорный переключатель нагрузки с основного источника на резервный

Таблица 34.40. Характеристики гибридных контакторов переменного тока

Тип контактора	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Частота включений в час, не более	Износостойкость, млн циклов		Размеры, мм			Масса, кг	Предельно допустимый сквозной ток короткого замыкания, кА	Время отключения, мс
				механическая	коммутационная	ширина	высота	глубина			
КТ64-33	380	160	1200	10	5	380	275	330	17,9	8	12
КТ65-33	660					380	280	345	19,4	9	
КТ64-35	380	250	1200	10	5	480	295	395	36	13	12
КТ65-35	660										
КТ64-37	380	400	600	5	5	580	330	445	72	9	20
КТ65-37	660										
КТ64-39	380	630	600	5	5	580	407	460	94	20	20
КТ65-39	660										
КТП64-33	380	160	2000	16	5	380	275	330	21,6	8	12
КТП65-33	660					380	280	345	23,0	9	
КТП64-35	380	250	2000	10	5	480	295	395	41,5	13	12
КТП65-35	660										
КТП64-37	380	400	1200	10	5	580	330	445	72	19	20
КТП65-37	660										
КТП64-39	380	630	1200	10	5	580	407	460	102	20	20
КТП65-39	660										

рование сигнала на принудительное выключение тиристоров должно происходить с выдержкой времени, необходимой для разведения контактов на расстояние, обеспечивающее необходимую электрическую прочность. Для обеспечения быстродействия в таких аппаратах используется форсированный привод электромеханической части аппарата. Последовательность включения и отключения ключевых элементов гибридного переключателя определяется его схемотехникой. Так, например, в схеме на рис. 34.23 при включении *ОИ* сначала включается один из основных тиристоров (*VS1*, *VS2*), а затем контакт *S1*. При отключении сначала подаются импульсы управления на тиристоры *VS1* и *VS2*, затем начинает размыкаться контакт *S1* и происходит включение тиристора *VS1* или *VS2*, на который переходит ток нагрузки. Далее с выдержкой времени, необходимой для восстановления электрической прочности контакта *S1*, поступают импульсы управления на вспомогательный тиристор *VS3* или *VS4* в зависимости от того, какой из основных тиристоров проводит ток. Включение вспомогательного тиристора приводит к принудительному запиранию основного. Для исключения перенапряжений на коммутирующих конденсаторах *C1* и *C2* включенне *РИ* должно производиться без перерыва питания нагрузки $Z_н$.

При использовании в гибридном аппарате индукционно-динамического привода в целях повышения быстродействия индуктивность обмотки последнего может использоваться вместо индуктивности *L1*(*L2*) колебательного контура коммутацин [34.11].

В настоящее время разработаны переключатели питания на номинальные токн 25, 63, 250 и 630 А, напряжение 380 В, частоту 50 Гц. Переключатели имеют плавно регулируемые уставки по напряженню переключенія в диапазоне $(0{,}65 \div 0{,}8)U_{ном}$ с допуском $\pm 0{,}05U_{ном}$, где $U_{ном}$ — номиналыное напряжение переключаемого источника.

Уставка по напряжению включенія обеих сетей равна $(0{,}9 \pm 0{,}05)U_{ном}$. Обеспечиваются два режима работы: "приоритет основной сетн (*ОИ*)" и "равнозначность". В режиме "приоритет *ОИ*" при снижении напряжения в *ОИ* ниже уставки выполняется переключение нагрузки на резервный источник, еслн напряженне на нем не менее $(0{,}9 \pm 0{,}05)U_{ном}$. Если оно меньше, то переключение не выполняется. При восстановлении напряжения *ОИ* до уровня $(0{,}9 \pm 0{,}05)U_{ном}$ выполняется обратное переключенне нагрузки.

Уставка по частоте, прн которой происходит переключение, составляет 48 Гц. Предельно допустн-

Таблица 34.41. Характеристика гибридных контакторов постоянного тока

Тип контактора	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Размеры, мм			Масса, кг	
			ширина	высота	глубина	контактора	блока
КП81-33	160	220	390	473	256	29	20
КП81-35	250		480	555	303	41,5	20
КП81-37	400		503	480	435	60	28
КП81-39	630		565	580	465	90	34

мый ток короткого замыкания, проходящий через включенный переключатель в течение времени не более 10 мс, равен 12 кА для номинальных токов $I_{ном}$ = 25 и 63 А; 30 кА для $I_{ном}$ = 250 А и 40 кА для $I_{ном}$ = 630 А. Время переключения не превышает 1,5 мс.

Принудительная коммутация тиристоров используется также в гибридных выключателях переменного тока, отличительная особенность которых состоит в использовании специальных средств для ускорения перевода тока из цепи контактов в цепь шунтирующих их тиристоров [34.11]. Для защиты тиристорных инверторов в агрегатах бесперебойного питания (АБП) разработаны гибридные выключатели переменного тока на номинальное напряжение 380 В и ток 63 А. В этих выключателях время от момента достижения током значения уставки до начала токоограничения равно 0,4 мс.

В гибридных аппаратах управления постоянного тока используются тиристоры с принудительной коммутацией, реализуемой по таким же схемам, как и в тиристорных прерывателях постоянного тока. Шунтирование тиристорного ключа электромеханическим контактом во включенном состоянии аппарата позволяет значительно снизить потери активной мощности.

На основе серийных двухполюсных контакторов постоянного тока КТП6000 и тиристорных блоков БПК51 разработаны гибридные контакторы постоянного тока серии КП81. Контакторы обеспечивают бездуговую коммутацию нагрузок с постоянной времени до 10 мс. Электрическая износостойкость контакторов в режиме нормальных коммутаций соответствует не менее чем 5 млн циклов при частоте включений до 2000 в час. Механическая износостойкость соответствует не менее чем 10 млн циклам. Основные параметры контакторов приведены в табл. 34.41.

Гибридные выключатели постоянного тока за счет повышения их быстродействия, достигаемого применением тиристоров, имеют более чем на порядок меньшее значение защитного показателя I^2t при отключениях токов КЗ. Так, например, для системы электроснабжения метрополитена разработан гибридный выключатель постоянного тока на базе контактного автомата ВАТ с номинальными значениями напряжения $U_{ном}$ = 825 В и тока $I_{ном}$ = 4 кА.

Защитный показатель I^2t гибридного аппарата соответствует $1{,}7 \cdot 10^3$ $А^2 \cdot с$, в то время как базовый контактный аппарат имел этот показатель равным $41 \cdot 10^3$ $А^2 \cdot с$. При этом за счет исключения из конструкции дугогасительных контактов и камер выключатель имеет меньшие габариты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

34.1. Буйлов А.Я. Основы электроаппаратостроения. М.: Госэнергоиздат, 1946.

34.2. Основы теорни электрнческих аппаратов: Учеб. для вузов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др. М.: Высшая школа, 1987.

34.3. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977.

34.4. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1970.

34.5. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970.

34.6. Никитенко А.Г. Автоматизнрованное проектирование электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1983.

34.7. Шихин А.Я. Автоматизированные снстемы измернтельных устройств. М.: Энергия, 1977.

34.8. Таев И.С. Электрическне аппараты управлення. М.: Высшая школа, 1984.

34.9. ГОСТ 19264-82. Электромагниты управления. Общие технпческне условия. М.: Изд-во стандартов, 1982.

34.10. Выбор электрических аппаратов для промышленных установок / Под ред. А.А. Чунихнна и Ю.С. Коробкова. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

34.11. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Раздел 35

АППАРАТЫ АВТОМАТИКИ

СОДЕРЖАНИЕ

35.1. Реле тока, напряжения и мощности . . 377
35.2. Промежуточные и сигнальные реле. Реле с выдержкой времени 378
35.3. Герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) 381
35.4. Электронные и комбинированные реле автоматики и защиты 388
Общие сведения (388). Статическое реле мощности серии РСМ13 (390). Реле тока с повышенной чувствительностью типа РТЗ-51 (392). Блок реле сопротивления типа БРЭ2801 (393).
35.5. Датчики 393
Общие сведения (393). Пассивные датчики (394). Активные датчики (399).
Спнсок литературы 400

35.1. РЕЛЕ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

К основным разновидностям реле тока, напряжения и мощности, применяемым в устройствах релейной защнты электрических станций, подстанций, сетей и различного электрооборудования, относятся следующие:

1. Реле тока максимальное типа РТ-40. Основано на электромагнитном прнпципе действня (П-образный шихтованный сердечник и Г-образный якорь) и имеет две обмотки управления, которые могут соединяться последовательно или параллельно в завнсимости от требуемого тока срабатывания. Диапазон уставок тока срабатывания от 0,05 до 200 А. Коэффициент возврата от 0,7 до 0,85. Время срабатывания не более 0,1 с при токе, равном 1,2 тока срабатывания, и не более 0,03 с при токе, равном 3-кратному току срабатывания [35.11].

2. Реле тока максимальное типа РТ-80. Состоит из двух элементов: индукционного элемента, срабатывающего с выдержкой времени, зависящей от тока уставки, электромагнитного расцепителя мгновенного действия, срабатывающего при токах короткого замыкания. Уставки времени срабатывания от 0,5 до 1б с. Коэффициент возврата реле не менее 0,8 с.

3. Реле напряжения РН-50. Реле максимального и минимального напряженпя основано на электромагнитном принципе (П-образный шихтованный сердечник с поворотным якорем). Обмотки реле через выпрямительный мост подсоединяются к сети переменного тока. Изменение уставкн осуществляется поворотом рычага и закручиванием спиральной пружины. Номинальное напряжение реле от 30 до 400 В. Пределы изменения уставки на срабатывание: 15÷60 В при номинальных напряжениях реле 30 и 60 В; 50÷200 В при 100 и 200 В; 100÷400 В при 200 и 400 В. Коэффициент возврата 0,8. Собственное время срабатывания реле не более 0,15 с при снижении напряженпя до 0,8 номинального.

4. Реле контроля синхронизма РН-55. Применяют в схемах автоматического повторного включения линий электропередачи с двусторонним питанием для контроля наличня напряжения на линии и угла сдвнга фаз между векторами напряжения на линии и шинах подстанции. Исполняются на напряжения от 30 до 100 В. Пределы изменения уставок угла сдвига фаз от 20 до 40°. Коэффициент возврата по углу до 0,8 при номинальном напряжении. Время срабатывания 0,15 с при угле сдвига фаз, равном полуторакратному значению уставки. Потребляемая мощность каждой обмотки прн номинальном режиме (номннальное напряженне н нулевой сдвиг фаз) 6,5 В·А. Коммутируемые мощности: постоянный ток — 60 Вт при напряжении до 220 В н токе до 2 А (постоянная времени до 0,05 с); переменный ток — 300 В·А при напряжении до 220 В и токе до 3 А. Реле основано на электромагнитном прнпципе. Магнитная система состоит из П-образного магиитопровода и поворотного якоря. Реле реагирует на геометрическую разность векторов напряжения, подводимых к выводам.

5. Фильтр-реле тока обратной последовательности типа РТФ-7. Предназначено для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных коротких замыканиях и перегрузках токами обратной последовательности; уставки на срабатыванне 0,2÷0,4 номинального тока.

6. Реле тока нулевой последовательности РТЗ-50. Предназначено для использования совместно с трансформаторами тока нулевой последовательности в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защит от замыканий на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыканий на землю. Имеются три диапазона плавно регулируемых уставок тока срабатывания: 0,01—0,02 А; 0,015—0,03 А; 0,03—0,06 А. Коэффициент возврата 0,9.

7. Реле тока обратной последовательности РТФ-6М. Предназначено для защиты мощных синхронных генераторов с форсированным охлаждением обмоток от повреждений при перегрузках токами обратной последовательностн, вызванными несимметрнчной нагрузкой, несимметричными короткими замыканиями или несанкционированными режимами работы системы. Реле образует четырехступенчатую максимальную токовую защиту обратной последовательности с действием первых двух ступеней на снгиал, а последующих двух — на отключение. Номинальный вторичный ток генератора может быть в пределах 0,7÷1,0 номинального тока реле.

8. Реле напряжения нулевой последовательности РНН-57. Используется в схемах поперечных дифференциальных защит, дистанционных защит с высокочастотной блокировкой в качестве реле максимального напряжения; уставки напряжения реле 4, 5, 6, 7 и 8 В, время срабатывания 0,04 с при двукратном токе уставки.

9. Реле напряжения прямой последовательности РНФ-2. Предназначено для применения в схемах форсировки возбуждения сиихронных генераторов. Реле реагирует на уменьшение напряжения прямой последовательности ниже допустимого значения; не реагирует на составляющие обратной и нулевой последовательности. Уставки линейного напряжения прямой последовательности 40÷80 и 80÷160 В.

10. Реле напряжения обратной последовательности РНФ-3. Предназначено для использования в схемах защиты в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричных коротких замыканий. Уставки линейного напряжения обратной последовательности 13,6÷24 В. Коэффициент возврата 0,95.

11. Дифференциальные реле ДЗТ-11 с магнитным торможением. Предназначены для дифференциальной защиты одной фазы силовых трансформаторов; МДС срабатывания 100 А; мощность отключения контактов 60 Вт.

12. Реле направления мощности РМБ-170/270. Основано на индукционном принципе (система с дисковым ротором). Номинальное переменное напряжение 100 В (50 Гц). Мощность срабатывания 0,2+0,4 В·А. Номинальный ток 1 или 5 А. Коэффициент возврата 0,6. Время действия реле при трехкратной мощности срабатывания 0,04 с. Обеспечивает правильный выбор направления мощности при токе 20-кратном номинального и напряжении 15 В, при токе 0,2 номинального и напряжении 100 В.

13. Реле активной мощности РБМ-275. Предназначено для контроля активной мощности одной фазы сети переменного тока. Реле имеет два диапазона регулируемых уставок мощности срабатывания: 10÷500 и 2÷100 Вт. Коэффициент возврата 0,85. Время срабатывания 0,12 с.

14. Реле реактивной мощности РБМ-276. Предназначено для контроля реактивной мощностн одной фазы сети переменного тока. Диапазон регулнрования мощности срабатывания у реле с номинальным током 1 А от 1,2 до 100 В·А, у реле с номинальным током 5 А — от 6 до 500 В·А.

15. Реле мощности обратной последовательности РМОП-2. Предназначено для защиты многообмоточных трансформаторов, автотрансформаторов и линий электропередачи прн несимметричных коротких замыканиях. В состав реле входят: два промежуточных трансформатора тока, активно-емкостные фильтры тока и напряжения обратной последовательности, индукционный элемент направления мощности и пусковые реле тока обратной последовательности. Ток небаланса при симметричном токе прямой последовательности, равном трехкратному номинального, не превышает 1,7 мА. Напряжение небаланса при симметричном напряжении прямой последовательности 100 В не превышает 2,6 В. Уставки тока срабатывания пускового реле 0,2÷0,8 номинального тока. Коэффицнент возврата пускового реле 0,8, реле направления мощности — 0,5.

16. Реле отстройки от апериодической составляющей РТН-560. Основано на применении насыщающихся трансформаторов и предназначено для дифференциальной защиты силовых трансформаторов, генераторов и шин. Магнитодвижущая сила срабатывания 100 А. Время срабатывания при трехкратном токе срабатывания 40 мс. Реле выдерживает 5000 срабатываний, из них 500 срабатываний с нагруженными контактами.

17. Реле перегрузки ИМ-145. Предназначено для защнты генераторов тока от перегрузки при отключеннн параллельно работающего генератора. Построено на индукционном принципе (с бегущим магнитным полем). Имеет зависимую от мощности выдержку времени. Предусмотрена возможность изменения уставки на мощность срабатывания и на выдержку времени срабатывания.

35.2. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ И СИГНАЛЬНЫЕ РЕЛЕ. РЕЛЕ С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

Основной класс коммутационных реле образуют электромагнитные промежуточные реле, отдельные разновидности и характеристики которых приводятся ниже (параметры некоторых реле даны в табл. 35.1).

1. Реле промежуточные серии РП-220. Реле быстродействующие. Предназначены для использования в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется усилить или размножить действие контактов основных реле защиты. Для увеличения быстродействия сердечник реле выполнен шихтованным. У некоторых исполнений реле (РП-223, РП-224) помимо основной обмотки управления имеются две илн три удерживающие токовые обмотки, включенные последовательно с замыкающими контактами. При отсутствии напряжения якорь реле может удерживаться в прнтянутом положении при прохождении тока по любой из удерживающих обмоток.

2. Реле промежуточные серии РП-230. Предназначены для применения в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется срабатывание реле от токовой обмотки и удерживание якоря в притянутом положении обмоткой напряжения (РП-232) или срабатывание реле от обмоток напряженнн и удерживание обмоткой тока (РП-233).

3. Реле промежуточные серии РП-251. Предназначены для применения в цепях постоянного тока с замедлением при срабатывании. Замедление достигается с помощью медных демпфирующих шайб, расположенных на сердечнике.

4. Реле промежуточные серии РП-252. Предназначены для применения в цепях постоянного тока с замедлением при возврате. Замедление обеспечивается медными демпфирующимн шайбами н медным каркасом катушки электромагнита. Для уменьшения зависимости времени возврата от напряжения

Таблица 35.1. Параметры некоторых промежуточных реле

Тип реле	Число контактов	Номинальное напряжение, В		Длительный ток контактов, А	Допустимая частота срабатываний, $ч^{-1}$	Износостойкость, число срабатываний	
		постоянное	переменное			коммутационная	механическая
ПЭ-20	4р+4з	—	12÷240	5	—	$(1÷2)\,10^6$	$4 \cdot 106$
ПЭ-21	4+8	12÷200	12+380	5	3000	До $3 \cdot 10^6$	$(3+5)\,10^6$
ПЭ-23	3з+3р	12÷110	12+240	4	3000	$(1÷3)\,10^6$	$(5+10)\,10^6$
РП-23	5	12÷220	—	—	—	—	—
РП-41; РП-42	8; 4	12÷220	—	10	—	10^6	10^7
ЭП-41В	3+6	—	36÷500	16	1200	10^6	—
РП-8; РП-9 РП-11; РП-12	1+7	24÷220	24÷220	24÷220	—	—	—
РПШ-0	4+12	—	12÷50	12	2000	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
МКУ-48с	2+6	12÷220	24÷380	5	3600	$25 \cdot 10^6$	—
МКУ-48г	2+8	12÷220	24÷380	5	3600	10^5	—

Примечание. з — замыкаемые контакты; р — размыкаемые контакты; с — связи; г — горные.

сердечник электромагнита при притянутом якоре сильно насыщен (индукция у зазора 1,6 Тл).

5. Реле промежуточное РП-253. Предназначено для применения в цепях постоянного тока в тех случаях, когда требуется удержание якоря в притянутом положении при прохождении тока в контролируемой цепи, замедленное срабатывание и быстрый возврат. Для замедления срабатывания применена демпферная обмотка, расположенная на одном каркасе с рабочей обмоткой.

6. Реле промежуточное РП-321. Применяется в схемах защиты на переменном токе. Предназначено для непосредственного включения в цепи вторичных обмоток трансформаторов тока. Термическая стойкость реле прн токах короткого замыкания обеспечивается применением промежуточного насыщающегося трансформатора.

7. Реле промежуточное РП-341. Предназначено для шунтирования и дешунтирования обмотки выключателя, включенной вместе с реле непосредственно во вторичную цепь трансформатора.

Разновидности сигнальных реле представлены в табл. 35.2, реле с выдержкой времени — в табл. 35.3

Таблица 35.2. Параметры некоторых сигнальных реле

Наименование	Тип реле	Номинальное напряжение или ток срабатывания	Число вспомогательных контактов
Реле импульсной сигнализации	РИС-Э3М	~220 В	1з+1р
	РИС-Э2М-0,2	=18; =60; =220 В	1з+1р
Реле сигнальные	РУ-21	=0,01÷=4 А (токовые); =12; =48; =220 В (напряжения)	2з 2з
Сигнальные устройства	ЭС-41	=0,01÷=0,5 В	4
Блоки сигнальных реле	СЭ-2	=0,01÷=1,0 А	2з
Реле счетно-импульсное	Е-531	~220 и ~380 В	1з+1р
Реле счетно-шаговое	Е-526	~127; ~220 и ~380 В	29 положений
	Е-511	~ 380 В	1з+1р
Реле счета импульсов	РСИ-1	~ 320 В	1з+1р
	РСИ-2	=220 В	—

Примечание. з — замыкаемые контакты; р — размыкаемые контакты.

Таблица 35.3. Параметры некоторых реле с выдержкой времени

Тип реле	Особенности конструкции	Напряжение, В	Выдержка времени, с	Число контактов		Ток через контакты, А			Примечание
				з	р	длительный	отключения	включения	
РЭВ-810	Постоянного тока. Замедление с помощью магнитного демпфирования (медная гильза, залитое алюминием основание)	12; 24; 48; 110; 220	0,25÷3,8	1,2	1,2	10	1÷40	20÷10	Могут применяться в качестве реле тока и напряжения; контакторы: раствор 3,5 мм, провал 1,5 мм, нажатие 1Н
Е-510	С двигателем постоянного тока (программные)	110; 220	1÷360	—	4	5	2	—	—
ЭВ-100	Постоянного тока с анкерным механизмом	24; 48; 110; 220	0,1÷20	1	—	3÷5	1÷5	—	—
ЭВ-200	Переменного тока с анкерным механизмом	127; 220	0,1÷20	1	1	3÷5	2÷5	—	Используется в схемах релейной защиты и автоматики
РВ-4	С двигателем переменного тока	127; 220; 380	—	1	1	—	—	—	—
РЭВ-800	Постоянного тока с магнитным демпфированием	12; 24; 48; 110; 220	0,25÷5,5	1,2	1,2	10	1÷15	10÷80	—
РЭВ-80	То же	22; 24; 48	0,25÷1,3	1,2	1,2	10	2÷15	10÷80	Могут применяться в качестве реле напряжения
РС-30	На герконах	24; 240	1÷90	—	—	2,5	—	—	—
РВГ-20111	То же	12; 24	0,2÷0,7	—	—	0,1	—	—	—
ВЛ-23	Полупроводниковые	110; 220	1÷100;	—	—	—	—	—	Используются в схемах управления и автоматики
			0,1—10 мин	—	—	—	—	—	—
ВЛ-37	То же	24	0,1÷10;	—	—	4	—	—	—
			0,2÷200	—	—	4	—	—	—

Примечание. з — замыкаемые контакты; р — размыкаемые контакты.

35.3. ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ КОНТАКТЫ (ГЕРКОНЫ)

Магнитоуправляемым контактом называется контакт электрической цепи, изменяющий ее состояние посредством механического замыкания или размыкания при воздействии управляющего магнитного поля на его элементы, совмещающие функции контактов и участков электрических и магнитных цепей. Магнитоуправляемый контакт, помещенный в герметизированный баллон, называется герметизированным магнитоуправляемым контактом, или герконом.

Существуют сухие (с твердыми контактами) и смоченные (жидкометаллическне) магнитоуправляемые контакты* (МК).

Так как детали МК реализуют функции контактов и участков электрических и магнитных цепей, им дали название "контактные сердечники" (КС); используется также термин "контакт-детали". Контактные сердечники бывают подвижными и неподвижными. Часто подвижные КС выполняются гибкими, в этом случае они играют роль возвратной пружины. Магнитоуправляемые контакты с гибкими подвижными КС называются безъякорными. К безъякорным относятся язычковые и мембранные МК, из которых первые получили наибольшее распространение. Якорные МК бывают как с возвратной пружиной, так и без нее. Возврат якоря в исходное положение при отсутствии пружины осуществляется магнитным полем. Мембранные безъякорные МК и якорные МК без возвратной пружины пока отечественной промышленностью не выпускаются.

Язычковыми называются МК, содержащие КС в виде консольно закрепленных пластин или стержней, изгибающихся под действием магнитного поля.

К наиболее распространенным видам сухих МК относятся: симметричный (рис. 35.1, *а*) и асимметричный (рис. 35.1, *г*) замыкающие МК; переключающий МК вида рп-з (рис. 35.1, *д*), у которого размыкаемый (р) КС *5* и переключающий (п) КС *4* закреплены с одной стороны герметизированного баллона *3*, а замыкаемый (з) КС *1* — с другой его стороны; переключающий МК вида рз-п (рис. 35.1, *е*), у которого размыкаемый КС *5* и замыкаемый КС *1* расположены с одной стороны баллона *3*, а переключающий КС *4* — с его противоположной стороны [35.1, 35.5, 35.9, 35.11÷35.13].

Симметричный язычковый замыкающий МК (см. рис. 35.1, *а*) является простейшей конструкцией, состоящей из одинаковых подвижных КС *1* и *2*, заваренных в стеклянную трубку диаметром от 2,0 до 5,5 мм, которая после изготовления МК образует герметизированный баллон *3*. Длина баллона составляет от 7,5 до 50 мм. Общая длина (с выводами) язычковых МК от 20 до 80 мм. При изготовлении МК баллон заполняется сухим защитным газом (например, азотом, водородом или их смесью) при различных давлениях или вакуумируется.

Внутренние концы КС, имеющие толщину h и ширину b, в язычковых МК перекрываются на расстоянии a (рис. 35.1, *а*, *б*) и имеют контактное покрытие размером Δ (рис. 35.1, *б*) от единиц до десятков микрометров.

При отсутствии управляющего магнитного поля перекрывающиеся поверхности внутренних концов КС удалены одна от другой на размер начального немагнитного* рабочего зазора $\delta_н$ (рис. 35.1, *б*). При этом между поверхностями контактных покры-

* Здесь и далее слово "герметизированные" опущено.

* В дальнейшем слово "немагнитный" опущено.

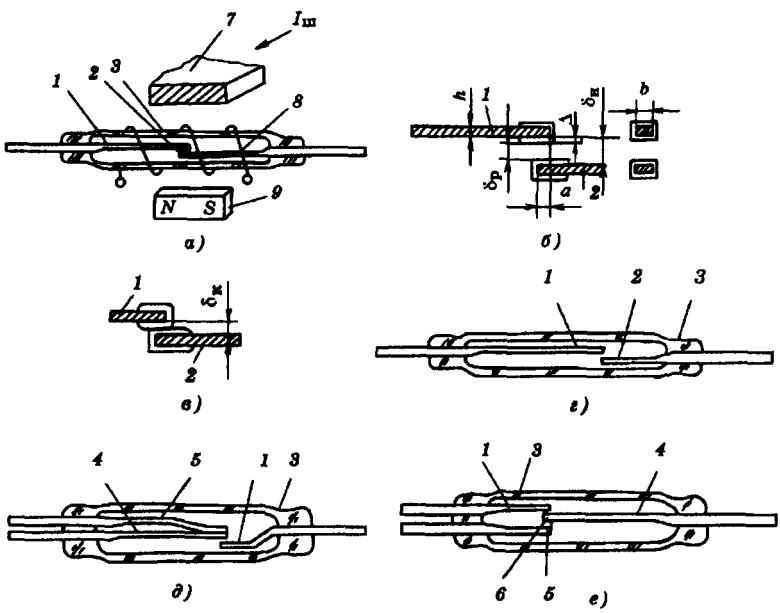


Рис. 35.1

тий имеется раствор $\delta_р$, который у язычковых МК составляет обычно от 40 до 300 мкм. Внешние концы КС служат для присоединеиия МК к коммутируемой электрической цепи.

При воздействии управляющего магнитного поля шиины *7* с током, обмотки *8* с током или постоянного магнита *9* (см. рис. 35.1, *а*) между КС возникает электромагнитная сила, которая, преодолевая механическую силу упругости КС, приближает их внутренние концы один к другому. При определенном значении поля (значении срабатывания) КС переходят в замкнутое состояние, которому соответствует конечный рабочий зазор $\delta_к$ (рис. 35.1, *в*). Уменьшение поля до значения отпускания вызывает размыкание КС под действием сил их упругости.

Асимметричный язычковый замыкающий МК (см. рис. 35.1, *г*) имеет разные КС, один из которых более гибкий. Такая конструктивная схема решает проблему миииатюризации, так как при этом для одного и того же раствора и возвращающей механической силы КС удается уменьшить длину баллона по сравнению со схемой симметричного исполнення.

В электрических аппаратах на базе замыкающих МК могут быть реализованы и размыкающие контакты, если использовать поляризующее магнитное поле, например, от постоянного магнита.

В исходном состоянии большинства язычковых переключающих МК (рис. 35.1, *д*, *е*) переключающий КС *4* механически поджат к размыкаемому КС *5*. При определенном значении управляющего магнитного поля происходит перемещение переключающего КС от размыкаемого (*5*) к замыкаемому (*1*) КС.

В конструкции, показанной на рис. 35.1, *д*, КС *1* обычно выполняется неподвижным; из двух других КС переключающий КС *4* обладает существенно большей гибкостью.

Конструкция, изображенная на рис. 35.1, *е*, имеет один подвижный и два неподвижных КС (*1* и *5*). Возможность переключения в этой конструкции обеспечивается за счет создания асимметрии: большего рабочего зазора между КС *4* и *5* по сравнению с зазором между КС *1* и *4* (с этой целью на КС *5* устанавливается немагнитная контакт-деталь *6*, например, как показано на рисунке), разных перекрытий между КС, выполнения КС *5* с меньшим поперечным сечением, чем КС *1*, с целью насыщения КС *5* при воздействии магнитного поля.

Основные данные отечественных сухих язычковых МК без магнитной памяти приведены в табл. 35.4.

Контактные сердечники язычковых МК могут быть выполнены не только из магнитомягких, но и из среднекоэрцитивных материалов ($H_c \approx 1{,}5 \div 4{,}0$ А/м) с высокой остаточной магнитной индукцией ($B_r \approx 1{,}4 \div 1{,}8$ Тл). В этом случае после замыкания МК его КС при снятии воздействия управляющего магнитного поля остаются в замкнутом состоянии за счет их остаточной магнитной энергии. Такие МК с магнитной памятью в России получили название "гезаконы" (герметизнрованные запоминающие контакты). В настоящее время гезаконы

Таблица 35.4. Основные показатели

Тип МК	$l_{МК}$, мм	$d \times l_б$, мм	$P_к$, В·А, Вт		$\Delta U_к$, В		$\Delta I_к$, А
			активная	индуктивная	Постоянный ток	Переменный ток	
Замыкающие							
КЭМ-1	80	5,6×50	30 Вт		$5 \cdot 10^{-2} \div 300$		$1 \cdot 10^{-6} \div 2$
					$5 \cdot 10^{-2} \div 220$	$5 \cdot 10^{-2} \div 150$	
КЭМ-6	64	4,2×37	20 Вт	—	$5 \cdot 10^{-2} \div 250$	$5 \cdot 10^{-2} \div 110$	$10^{-3} \div 1$
		4,1×36	15 Вт	6 Вт	$5 \cdot 10^{-2} \div 150$		$10^{-3} \div 0{,}25$
МКА-36701	65,3	5,4×36	21 Вт	—	3÷100		0,01÷0,35
МКА-27101	45,6	3,6×27	12 Вт (постоянный ток), 20 Вт (переменный ток)	1,5 В·А (переменный ток)	$5 \cdot 10^{-2} \div 250$	$5 \cdot 10^{-2} \div 150$	$1 \cdot 10^{-6} \div 0{,}5$
			12 Вт		$1 \cdot 10^{-3} \div 110$	$1 \cdot 10^{-3} \div 150$	$1 \cdot 10^{-6} \div 0{,}35$
МКА-27102	52	3,6×27	12 Вт (постоянный ток), 20 Вт (переменный ток)	1,5 В·А (переменный ток)	$1 \cdot 10^{-3} \div 110$	$1 \cdot 10^{-3} \div 150$	$1 \cdot 10^{-6} \div 0{,}5$

изготавливаются только по конструктивной схеме, изображенной на рис. 35.1, *а*. В России разработаны два типа геза конов: МКА-20601 с длиной баллона 20 мм и МКА-27601 с длиной баллона 27 мм.

Смоченные МК (жидкометаллические — ЖМК) — это МК, внутри герметизированного баллона которых токопроводящие детали частично или полностью смочены жидким металлом. Наиболее распространенным смачивающим материалом в настоящее время является ртуть. Существуют язычковые замыкающие и переключающие ЖМК. К отечественным язычковым ЖМК относятся КРМ-6 (замыкающий) и МКСР-45181 (переключающий) (табл. 35.5). Ртуть в этих ЖМК к месту контактирования поднимается по капиллярам из резервуара, находящегося внизу баллона. Резервуарные ЖМК могут работать при отклонениях от вертикального положения на 15—45°.

Существуют язычковые безрезервуарные ЖМК (например, отечественный МКАР-15102 — см. табл. 35.5), в которых жидкий металл находится в капиллярах переключающего КС. Такие ЖМК могут работать в любом пространственном положении, как и сухие МК.

Примеры якорных МК даны на рис. 35.2 и 35.3. В них подвижный КС выполняет, как и в безъякорных конструкциях, функцию участка магнитной цепи. Ток однако во многих этих МК проходит по подвижному КС только частично. А функция возвратной пружины с подвижного КС полностью снята.

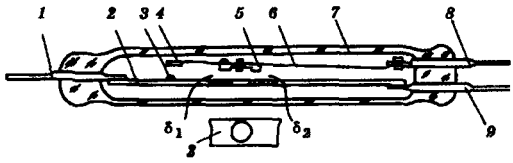


Рис. 35.2

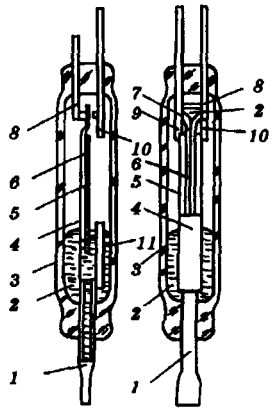


Рис. 35.3

На рис. 35.2 изображена одна из таких конструкций — отечественный сухой замыкающий МК типа МКА-52202 повышенной коммутируемой мощности, особенность которого состоит в том, что неподотечественных сухих язычковых МК [35.1, 35.5, 35.11—35.13]

N *, сраб	$f_к$ **, сраб/с	$R_к$ **, Ом	$F_{ср}$, A	$K_в$	$t_{ср}$ **, мс	$t_{от}$ **, мс	$U_{пр_{\sim}}$ / $U_{пр_{=}}$, В
Замыкающие							
$5 \cdot 10^4 \div 10^8$	$10 \div 50^*$	0,1	Гр. *** А 50÷72 Гр. Б 68÷92 Гр. В 88÷120	0,3÷0,9	2	0,8	500/700
$5 \cdot 10^3 \div 10^8$	20÷100	0,08	Гр.А 55÷85 Гр.Б 75÷110	0,4÷0,85	3		
$10^3 \div 5 \cdot 10^6$	50	0,2	Гр.А 35÷50 Гр.Б 45÷60	0,3÷0,9	2	0,5	360/500
$10^6 \div 2{,}5 \cdot 10^7$	20	0,1	38÷50				500/500
$2 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^7$	$20 \div 50^*$	0,07	Гр.А 50÷66 Гр.Б 60÷80	0,4÷0,8	2	2	500/700
$10^4 \div 5 \cdot 10^6$	50	0,3	Гр. А 30÷45 Гр. Б 40÷60 Гр. В 55÷80 Гр. С 30÷60	0,35÷0,85	1	0,5	500/500
$2 \cdot 10^5 \div 10^8$		0,12	Гр. А, АМ 30÷45 Гр. Б 40÷60 Гр. БМ 40÷68	0,35÷0,8	1,5		500/700
$1 \cdot 10^4 \div 10^7$	25	0,1	35÷60	0,4÷0,8	1,5	0,5	500/700

Тип МК	$l_{МК}$, мм	$d \times l_б$, мм	$P_к$, В·А, Вт		$\Delta U_к$, В		$\Delta I_к$, А
			активная	индуктивная	Постоянный ток	Переменный ток	
КЭМ-2	45,6	3,2×20	12 Вт	—	Гр. ***О, А, Б $5\cdot10^{-2}\div180$	Гр. ***О, А, Б $5\cdot10^{-2}\div130$	$10^{-4}\div0,5$
		3×20	7,5 Вт		Гр. А, Б, В $5\cdot10^{-2}\div180$	Гр. А, Б, В $5\cdot10^{-2}\div130$	Гр. А, Б, В $5\cdot10^{-6}\div0,25$
					Гр. С $5\cdot10^{-2}\div30$		Гр. С $5\cdot10^{-6}\div10^{-2}$
МУК-1А-1	40	3×21	15 Вт	—	$5\cdot10^{-2}\div160$	—	$5\cdot10^{-6}\div0,5$
					$5\cdot10^{-2}\div115$		$1\cdot10^{-6}\div0,5$
МК-17	45,5	3,1×20	7,5 Вт	—	—	$2\cdot10^{-6}\div80$	$5\cdot10^{-12}\div0,25$
МКА-20101	55	3×20	7,5 Вт	6 В·А	$5\cdot10^{-2}\div180$	$5\cdot10^{-2}\div130$	$1\cdot10^{-6}\div0,35$
МК-16-3	35	2,8×16	3 Вт	—	$0,5\div36$	—	$1\cdot10^{-5}\div0,12$
МК-10-3	40,6	2,3×10	10 Вт	0,6 В·А	$5\cdot10^{-2}\div100$ (активная) $5\cdot10^{-2}\div36$ (индуктивная)		$1\cdot10^{-6}\div0,5$
			—	—	$5\cdot10^{-2}\div36$		$1\cdot10^{-6}\div0,1$
МКА-10104	49,6	2,2×10	10 Вт	0,6 В·А	$5\cdot10^{-2}\div100$	$5\cdot10^{-2}\div36$	$1\cdot10^{-6}\div0,5$
МКА-10501	40,7	2,3×10	5Вт	—	—	$1\cdot10^{-4}\div80$	$50\cdot10^{-12}\div0,25$
						$2\cdot10^{-6}\div90$	
МКА-52141	80	5,5 (12 max)×52	50 Вт до 1 кВ, 10 Вт выше 1 кВ	—	$1\div5000$	—	$1\cdot10^{-4}\div3$
МКА-52142	79	5,5×52	50 Вт до 1 кВ, 10 Вт выше 1 кВ	—	$1\div5000$	—	$1\cdot10^{-4}\div3$
МКА-50201	80	5,6×50	120 Вт	90 В·А	$12\div250$		$0,01\div3$ (активная); $0,01\div0,4$ (индуктивная)
МКА-50701	80	5,4×50	50 Вт	—	$1\div250$	—	$0,1\div1$
Переключающие							
КЭМ-3	54	4,5×18	7,5 Вт (переменный ток); 30 Вт (постоянный ток)	—	$5\cdot10^{-2}\div125$		$5\cdot10^{-6}\div1$ (постоянный ток); $5\cdot10^{-6}\div0,2$ (переменный ток)
			7,5 В·А (переменный ток)		$5\cdot10^{-2}\div127$		$1\cdot10^{-6}\div1$
			15 Вт — для Гр. О, А, Б, В; 30 Вт — для Гр. АД	—			

Продолжение табл. 35.4

N,* сраб	$f_к$,** сраб/с	$R_к$,** Ом	$F_{ср}$, А	$K_в$	$t_{ср}$,** мс	$t_{от}$,** мс	$U_{пр\sim}$ / $U_{пр=}$, В
$5\cdot10^4\div10^7$	100	0,25	Гр. О 15÷25 Гр. А 21÷42 Гр. Б 32÷64	0,3÷0,9	2	0,5	180/250
$5\cdot10^4\div10^8$		0,15	Гр. А 21÷32 Гр. Б 26÷42 Гр. В 35÷64	0,35÷0,9	1		Гр.*** А, Б, С 200/280 Гр. В 225/320
$2\cdot10^3\div10^7$	0,5÷100*	0,3	20÷75	0,3÷0,9	1	0,3	127/180
	1÷100*		Гр. А 40÷90 Гр. Б 35÷45		2		200/280
$10^5\div10^7$	100	0,4	Гр. А 24÷72 Гр.Б 40÷96	0,24÷0,9	1	0,3	150/210
		0,15	Гр. А 30÷60 Гр. Б 55÷80	0,5÷0,9	1,5		180/250
$5\cdot10^4\div10^8$	100	0,15	21÷42	0,35÷0,9	1	0,3	200/280
До $4\cdot10^6$	100	0,15	15÷35	0,3÷0,9	0,8	0,3	127/—
$10^3\div5\cdot10^6$	10÷100*	0,3	Гр. А 12÷30 Гр. Б 23÷60	0,35÷0,9	0,6	0,3	110/150
$10^5\div10^8$			Гр. А 13÷25 Гр. Б 18÷40	0,5÷0,9	0,8		
$10^3\div5\cdot10^6$	10÷400*	0,3	Гр. А 10÷30 Гр. Б 10÷40	0,35÷0,9	0,5	0,3	110/150
$10^5\div2\cdot10^6$	100	0,3	15÷45	0,35÷0,9	0,8	0,3	110/150
$10^5\div2{,}5\cdot10^6$		0,2	16÷35	0,5÷0,9			130/180
$1\cdot10^6$	50	0,1	Гр. А 80÷130 Гр. Б 120÷200	0,5÷0,9	3	2	—/7500
$1\cdot10^5$	50	0,1	150÷300	0,3÷0,7	3	2	—/10 000
$5\cdot10^3\div10^8$	25	0,2	50÷90	0,4÷0,9	2	1	500/700
10^4; $5\cdot10^5$ при γ = 95%	100	0,2	50÷100	0,4÷0,8	3	2	—/1000
Переключающие							
$10^3\div10^6$	1÷50*	0,5	Гр. О 30÷50; Гр. А 42÷66; Гр. Б 58÷83; Гр. В 75÷100	Гр. АД 35÷75	0,3÷0,9	1,5	2	Гр. О 127/180 Гр. А 150/210 Гр. Б, В 200/280 Гр. АД 127/ 180
$10^3\div2\cdot10^6$		0,15		Гр. АД 42÷66	0,35÷0,9			Гр. О 127/180 Гр. А 150/180 Гр. Б, В 200/280 Гр. АД 150/210

Тип МК	$l_{МК}$, мм	$d \times l_б$, мм	$P_к$, В·А, Вт		$\Delta U_к$, В		$\Delta I_к$, А
			активная	индуктивная	Постоянный ток	Переменный ток	
МКС-27103	67	5,3×27	30 Вт	1,5 В·А	$5 \cdot 10^{-2} \div 200$	$5 \cdot 10^{-2} \div 220$	$5 \cdot 10^{-6} \div 1$
			30 Вт		$10^{-2} \div 150$	$10^{-2} \div 220$	$10^{-6} \div 1$
МКС-17702	54	4×17	30 Вт****		6÷30	—	0,05÷1

Обозначения: $l_{МК}$ — общая длина МК; $d \times l_б$ — диаметр и длина баллона; $P_к$ — коммутируемая мощность; $\Delta U_к$ — диапазон коммутируемых напряжений; $\Delta I_к$ — диапазон коммутируемых токов; N — количество срабатываний; $f_к$ — частота коммутаций; $R_к$ — сопротивление МК; $F_{ср}$ — МДС срабатывания; $K_в$ — коэффициент возврата; $t_{ср}$ — время срабатывания; $t_{от}$ — время отпускания; $U_{пр}$ — электрическая прочность; γ — допустимая вероятность.

Таблица 35.5. Параметры некоторых отечественных ртутных МК [35.1, 35.5, 35.11, 35.12]

Параметр	Тип					
	КРМ-6	МКСР-45181	МКАР-15101	МКАР-15102	МКДР-45281	МКАР-38201, МКАР-38202
Общая длина, мм	68	68	40	40	66	66
Диаметр и длина баллона, мм	8×45	8×45	3,5×15,9	3,5×15,9	8,5×45	10×40
Коммутируемая мощность	60 Вт	50 Вт	50 В·А	30 В·А	250 Вт	40 Вт, 240 В·А
Коммутируемый ток, А	2	$10^{-6} \div 1$	2	1	5	$10^{-9} \div 1$
Коммутируемое напряжение, В	500	$10^{-5} \div 300$	500	500	600	$10^{-6} \div 40$ (постоянное); $10^{-6} \div 240$ (переменное)
Количество срабатываний	$2 \cdot 10^{9*}$	$2 \cdot 10^{7}$ при 50 В и 1 А; $5 \cdot 10^{8}$ при 16 В и 0,5 А	10^{9*}; 10^{8**}	10^{8*}; $3 \cdot 10^{5**}$	10^{9*}	10^{6}
Максимальная частота коммутаций, сраб/с	—	1÷50	100	200	50	—
Сопротивление, Ом	0,045	0,03	0,05	0,03	0,025	0,03
Магнитодвижущая сила срабатывания, А	200	Гр. А*** 100÷150; Гр. Б*** 140÷200	45÷65	45÷65	100÷200	500
Коэффициент возврата	0,3÷0,9	0,55÷0,9	0,45÷0,9	0,3÷0,9	0,4÷0,9	0,5
Время срабатывания, мс, не более	4	6	2,5	1,2	7	—
Время отпускания, мс, не более	3	15	2,5	1,4	6	
Электрическая прочность, В	1000 (действующее значение)	2500 (постоянное)	1500 (постоянное)	1500 (постоянное)	1500 (действующее значение)	2000 (действующее значение)
Сопротивление изоляции, Ом	10^{11}	10^{9}	$10^{9} \div 2 \cdot 10^{13}$	$10^{9} \div 5 \cdot 10^{13}$	10^{9}	$2 \cdot 10^{8}$
Диапазон рабочих температур, °С	1÷85	—25÷+60	—35÷+125	—35÷+100	—35÷+135	—35÷+60

Окончание табл. 35.4

N^*, сраб	$f_к^{**}$, сраб/с	$R_к^{**}$, Ом	$F_{ср}$, А	$K_в$	$t_{ср}^{**}$, мс	$t_{от}^{**}$, мс	$U_{пр\sim}$ / $U_{пр=}$, В
$10^4 \div 5 \cdot 10^6$	$1 \div 50^*$	0,3	Гр. А 45÷70; Гр. Б 65÷90	0,35÷0,9	1,5	2,5	250/350
$10^4 \div 10^8$		0,15	50÷74	0,4÷0,8			500/700
$2,5 \cdot 10^5$	≤5	0,15	60÷90	0,6÷0,98	2	2	127/180

* В зависимости от тока, напряжения и характера нагрузки.
** Указаны максимальные значения.
*** Гр. А, Б, В, С, АД, О и др. — группы по диапазонам МДС срабатывания.
**** Ламповая и активно-индуктивная нагрузка с постоянной времени $\tau \leq 5$мс.

Окончание табл. 35.5

Параметр	Тип					
	КРМ-6	МКСР-45181	МКАР-15101	МКАР-15102	МКДР-45281	МКАР-38201, МКАР-38202
Вибростойкость:						
частота, Гц	1÷60	1÷55	1÷55	1÷55	1÷55	10÷55
ускорение, м/с^2	9,8	9,8	9,8	19,6	19,6	9,8
Ударостойкость, м/с^2	147	147	147	147	—	—
Линейные ускорения, м/с^2	—	—	—	490	490	—

* В режиме "сухой" цепи.
** В предельном режиме с искрогашением.
*** Гр. А, Б — группы по МДС срабатывания.

вижный КС *2* выполнен в виде полоски, приваренной к внутренним концам вводов *1* и *9*.

В средней части КС *2* имеется отверстие, образующее два участка с суммарным поперечным сечением, меньшим, чем в остальной части этого КС. При управлении МК магнитным полем эти участки насыщаются. В результате создаются два полюса, к которым соответственно в областях двух рабочих зазоров δ_1 и δ_2 притягивается якорь *5*, закрепленный на электропроводящей возвратной пружине *6*, соединенной с вводом *8* и представляющей собой единое целое с контактной пружиной, на которой расположена контакт-деталь *4*. Контактная пружина имеет изгиб, упирающийся в баллон *7* при разомкнутом состоянии МК. Напротив контакт-детали *4* расположена неподвижная контакт-деталь *3*. При срабатывании сначала замыкаются контакт-детали *3* и *4*, а затем якорь *5* с КС *2*. Размыкание происходит в обратном порядке. В замкнутом состоянии ток проходит от ввода *1* (может также проходить от ввода *9*) по КС *2*, затем по двум параллельным путям (через контакт-детали *4* и *3* и притянутый якорь *5*) в пружину *6* и далее по вводу *8*.

Такой МК предназначен для коммутации активных и индуктивных цепей с током до 4 А и напряжением до 220 В постоянного и до 380 В переменного тока с частотой 50 Гц, мощностью до 250 В·А. При переменном напряжении 110 В и $\cos\varphi \geq 0,35$ он обеспечивает 2,5 млн циклов включения тока 3,0 А и отключения тока 0,4 А. Контактное сопротивление не более 200 мОм, сопротивление изоляции не менее 75 МОм. Магнитодвижущая сила срабатывания от 180 до 270 А, МДС отпускания не менее 60 А. Время срабатывания не более 8 мс, время отпускания не более 7 мс. Аналогичную конструкцию имеет и отечественный переключающий МК повышенной мощности (тип МКС-52201).

Разработан и выпускается промышленностью мощный якорный геркон типа МКА-60301. Некоторые его характеристики (ТУ 6343-005-07521179-95) указаны ниже:

Коммутируемое напряжение при индуктивной нагрузке, В:
переменное ($\cos\varphi = 0,5$):
не менее 6
не более 370
постоянное (постоянная времени $\tau = 0,05$ с):
не менее 6
не более 140

Коммутируемые включаемый и отключаемый токи при индуктивной нагрузке, А:
переменный:
не менее 0,01
не более 12,5
постоянный:
не менее 0,01
не более 3

Коммутируемая мощность при индуктивной нагрузке, кВт:
переменный ток
не менее 0,025
не более 1,88
постоянный ток
не менее 0,06
не более 0,42

Контактное сопротивление, Ом, *не более* *0,250*

Сопротивление изоляции, МОм, не менее 20

Электрическая прочность изоляции, кВ . . . . . 1,3—2,25

МДС срабатывания, А:
группа А:
не менее 200
не более 325
группа Б:
не менее 325
не более 450

Время срабатывания, мс, не более 10

Время отпускания, мс, не более 7

Общая длина геркона, мм 90

Размеры баллона, мм:
диаметр 10,7
длина 60

На рис. 35.3 изображен ртутный переключающий ЖМК типа МКДР-45281 (см. табл. 35.5). Якорь *5* подвешен на возвратной пружине *4*, приваренной к штангелю *1*. На якоре расположен контактный элемент *6*, образующий капилляр, по которому ртуть из резервуара внизу баллона *3* поднимается к местам контактирования.

В невозбужденном состоянии подвижная система поджата пружиной *4* к контакт-деталям, расположенным на неподвижных КС *7* и *8*. При возбуждении магнитным полем якорь притягивается к перекрывающимся с ним концам неподвижных КС *9* и *10*. Контактный элемент при этом размыкается с контакт-деталями на КС *7* и *8* и замыкается с контакт-деталями на КС *9* и *10*, осуществляя переключение электрических цепей. Для повышения чувствительности ЖМК в конструкцию введен дополнительный магнитопровод *11*, приваренный к штангелю *1* и имеющий перекрытие с якорем. Такой ЖМК при работе со схемами искрогашения имеет максимальную коммутируемую мощность 250 В·А.

Магнитоуправляемые контакты применяются в качестве элементной базы в реле, переключателях, кнопках, распределителях сигналов, датчиках, матричных соединителях и других электрических аппаратах, выпускаемых отечественной промышленностью.

Более подробные сведения о герконах и аппаратах на их базе приведены в отдельном справочнике [35.1, 35.5, 35.11, 35.12] и других источниках.

35.4. ЭЛЕКТРОННЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ РЕЛЕ АВТОМАТИКИ И ЗАЩИТЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В электронных реле автоматики и защиты коммутация основной электрической цепи осуществляется полупроводниковым элементом; в комбинированных реле информационно-логические и управляющие функциональные узлы выполнены на электронных элементах, а исполнительные — на основе электромеханических реле. К комбинированным реле можно также отнести электромеханические реле, которые схемотехнически и конструктивно дополнены электронными компонентами (транзисторами, диодами и др.) в целях расширения функциональных возможностей реле и улучшения их технико-экономических характеристик. В состав некоторых типов электронных реле защиты входят датчики контролируемых параметров (трансформаторные, делители напряжения, датчики частоты и др.).

Элементной базой электронных реле являются как дискретные полупроводниковые элементы (транзисторы, тиристоры, диоды и др.), так и интегральные микросхемы различной степени интеграции, включая средства микропроцессорной техники. Технология изготовления современных реле соответствует технологии микроэлектронной техники.

На рис. 35.4 представлена структурная схема транзисторного реле, состоящая из системы управления *СУ*, получающей сигнал $U_{упр}$, и выходного транзистора *VT*, осуществляющего коммутацию цепи в общем случае с нагрузкой $z_н$, хотя обычно в схемах чаще встречается активная нагрузка $R_н$. При активно-индуктивной нагрузке для шунтирования индуктивной составляющей тока после выключения транзистора в схему вводят обратный диод *VD*. Схема получает питание от источника *E*. При относительно небольших значениях, указываемых в технических характеристиках реле, индуктивной составляющей в нагрузке, энергия, накапливаемая в ней, отводится в *RC*-цепи, входящие в схему реле, а затем рассеивается в тепловыделяющих активных элементах. Схемотехника *СУ* определяется функциями реле и элементной базой.

Простейшими вариантами транзисторных реле являются схемы усилителей постоянного тока с глубокими положительными обратными связями, обеспечивающими релейный режим работы основного транзистора, например схема двухкаскадного усилителя с положительной связью по напряжению в виде резистора $R_{о.с}$ (рис. 35.5).

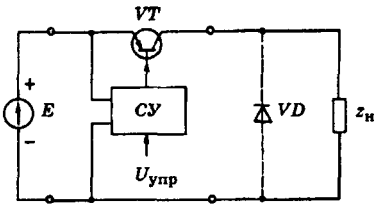


Рис. 35.4

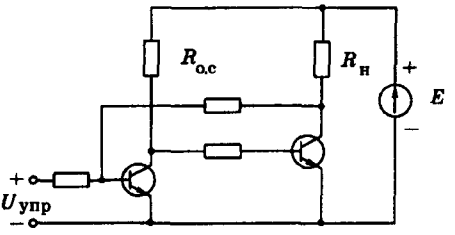


Рис. 35.5

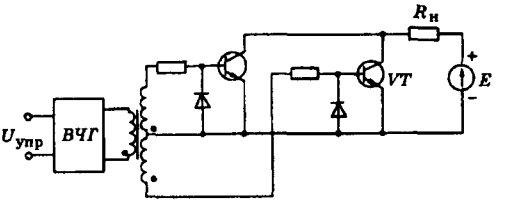


Рис. 35.7

В зависимости от условий применения электронных реле к ним могут предъявляться различные требования по обеспечению гальванической развязки входной (управляющей) и выходной (коммутируемой) цепями.

В электронных реле используются в основном два способа обеспечения гальванической развязки: оптоэлектронный (рис. 35.6) и трансформаторный (рис. 35.7).

На рис. 35.6 представлено реле с оптоэлектронной развязкой, выполненное на основе фототранзистора $VT_р$. При отсутствии сигнала управления $U_{упр}$ на входе фототранзистора $VT_р$ все транзисторы выключены, что соответствует разомкнутому состоянию цепи нагрузки. Включение реле осуществляется подачей маломощного сигнала управления $U_{упр}$. Функции оптоэлектронной развязки могут выполнять различные типы оптоэлектронных пар (фотодиодная, фоторезисторная и др.).

Основой реле с трансформаторной развязкой являются маломощные высокочастотные генераторы ВЧГ обычно с прямоугольной формой выходного напряжения. Это напряжение выпрямляется и используется для управления транзисторным ключом.

В целях улучшения технико-экономических показателей промежуточный выпрямитель может быть исключен за счет введения в схему дополнительных транзисторов в оконечном каскаде, как это показано на схеме рис. 35.7.

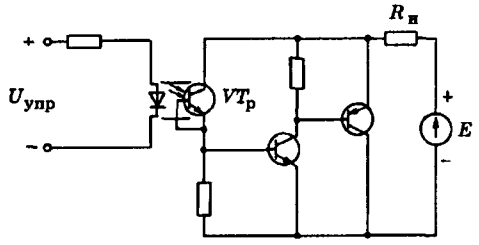


Рис. 35.6

В реле с расширенными функциями, например, имеющими несколько каналов управления или оконченных каскадом, могут использоваться оба способа гальванической развязки. Так, например, в бесконтактном реле постоянного тока с защитой от короткого замыкания в цепи нагрузки, схема которого приведена на рис. 35.8, основной канал управления имеет трансформаторную развязку, а канал защиты — оптоэлектронную. Принцип действия реле следующий. При подаче напряжения на входные зажимы управления преобразователь *1* формирует переменное напряжение, которое поступает на трансформатор *2*, затем выпрямляется в выпрямителе *3* и подается на базу коммутирующего составного транзистора *4*. При возникновении КЗ детектор *5* формирует сигнал, который через оптоэлектронную пару *6* и устройство задержки *7* поступает на вход триггера защиты *8*. Срабатывание триггера приводит к выключению преобразователя *1* и отключению реле. После срабатывания защиты для повторного включения реле необходимо обесточить цепь управления.

Для электронных бесконтактных реле переменного тока выходной транзистор *VT* обычно включается в схему, как показано на рис. 35.9.

Функциональные возможности реле в основном определяются схемотехникой системы управления *СУ*. Включением в *СУ* времязадающих электронных устройств регулируются электронные реле времени. Применение для этих целей интегральных микросхем позволяет обеспечить точность и стабильность значений времени выдержки срабатывания реле в широких диапазонах от долей секунд до десятков часов и более. Вариант структурной схемы *СУ* электронного реле времени представлен на рис. 35.10. Выдержки времени в этом реле формируются посредством подсчета числа импульсов генератора

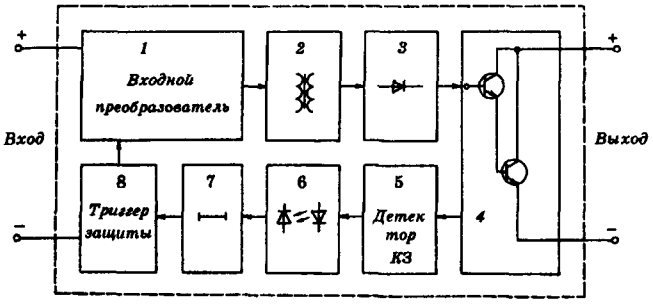


Рис. 35.8

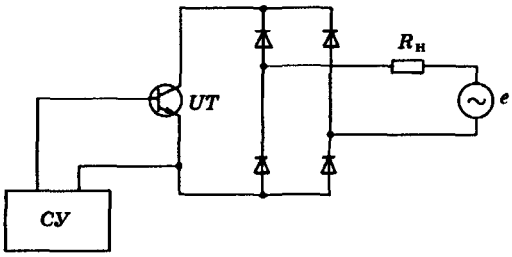


Рис. 35.9

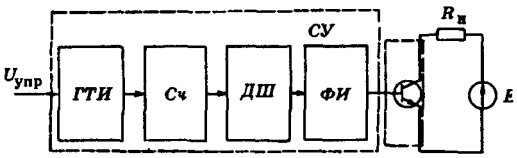


Рис. 35.10

тактовых импульсов *ГТИ* счетчиком *Сч*. Сигнал с дешифратора *ДШ* поступает на формирователь импульса управления *ФИ*, который включает выходной транзистор (или каскад составных транзисторов).

Если нет жестких требований к стабильности временной выдержки, то в *СУ* в качестве времязадающей цепи используются *RC*-цепи.

В настоящее время разработана серия коммутационных реле времени типа РВЭ1А, РВЭ2А и РВЭ3А.

Реле серии РВЭ3А имеют бесконтактный вариант исполнения с основными техническими характеристиками, приведенными ниже:

Рабочее напряжение, В	$27^{+5}_{-3,5}$
Максимальный коммутируемый ток при активной нагрузке 280 Ом или активно-индуктивной нагрузке с постоянной времени 1 мс, мА	115
Время срабатывания, с	0,05÷900
Время непрерывного пребывания под током, ч	1500
Ударостойкость, м/с^2	750
Температура окружающей среды, °С	—60÷+85
Масса, г	60

Выходным ключевым элементом большинства типов бесконтактных реле являются транзисторы (биполярные, полевые и др.). Однако в отдельных случаях схемотехника реле, включая его *СУ*, существенно упрощается, если используются другие типы полупроводниковых элементов, например маломощные тиристоры. Так, поляризованное одновходовое реле может быть выполнено на основе двух маломощных тиристоров *VS1* и *VS2* (рис. 35.11). При воздействии импульса управления $U_{упр}$ в зависимости от его полярности формируется отпирающий импульс на управляющем электроде соответствующего тиристора. Последний включается, если находился в выключенном состоянии, или сохраняет включенное состояние. Другой тиристор сохраняет выключенное состояние либо выключается.

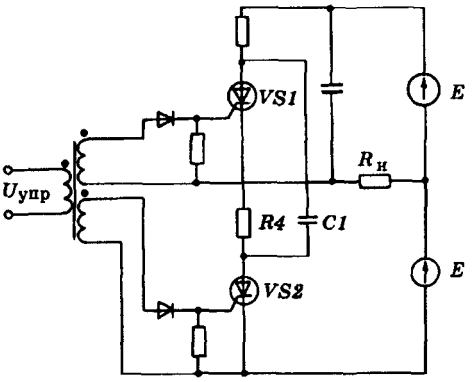


Рис. 35.11

Выключение этого тиристора происходит под воздействием разрядного тока коммутирующего конденсатора *C1*. Так, если тиристор *VS1* был выключен, а *VS2* включен, то конденсатор *C1* к моменту поступления импульса $U_{упр}$ был заряжен до напряжения, близкого к $2E$. Включение тиристора *VS1* вызывает разряд конденсатора *C1* током, направленным встречно току включенного тиристора *VS2* и, следовательно, выключение последнего. Время выключения тиристора определяется постоянной времени разрядной цепи $\tau = C_1 R_н$. После коммутации схема сохраняет свое состояние до момента прихода импульса управления $U_{упр}$ противоположной полярности.

На основе рассмотренной схемы реализуются функции двухпозиционного поляризованного реле.

Современная технология микроэлектроники позволяет выполнить *СУ* электронных реле с очень широкими функциями, включая самоконтроль и диагностику реле. Такие реле с расширенными функциями в интегральном исполнении относятся к новому классу электронных устройств, схемы которых называют "интеллектуальными" или "разумными".

Для релейной защиты электрических систем отечественной промышленностью разработаны электронные и комбинированные реле с контрольными функциями различных электрических параметров (реле частоты, контроля токов нулевой или обратной последовательности, мощности и др.). Ниже приводятся краткие технические характеристики некоторых из таких устройств.

СТАТИЧЕСКОЕ РЕЛЕ МОЩНОСТИ СЕРИИ РСМ13

Реагирует на значение и направление активной мощности и может быть использовано в коллекторных устройствах, от которых требуется повышенная устойчивость к механическим (сейсмическим) воздействиям. Реле может применяться и во всех других случаях, когда имеется возможность потребления оперативного постоянного тока, необходимого для функционирования настоящего реле, так как

оно выполнено с нспользованием электронных (статических) элементов.

Реле имеет однн замыкаемый и однн размыкаемый контакт.

Замыкаемый контакт реле обеспечивает не менее 100 включений постоянного тока 20 А при напряжении не выше 250 В и продолжительности протекання тока не более 0,5 с. Минимальный ток контактов 0,01 А прн напряженин не ниже 110 В или 0,05 А при напряженни не ниже 24 В; длительно допустнмый ток контактов 35 А.

Механические характеристики реле

Механическая износостойкость реле, цнклы 100 000
Коммутационная износостойкость реле, циклы, не менее 12 500
Установленная безотказная наработка реле, циклы включення-отключення (ВО), не менее 800
Средняя наработка на отказ реле, цнклы ВО, не менее 12 500
Установленный ресурс, циклы ВО, не менее 50 000
Средний ресурс, циклы ВО, не менее 100 000
Среднее время восстановления работоспособного состояния реле, ч, не более . . . . . 3÷6
Средний срок сохраняемости, годы, не менее 3

Электрические характеристики реле

Максимальные габаритные размеры, мм . . . . . 160×152×194±3
Номинальный ток, А . . . . . 1 или 5
Номинальное входное напряжение, В . . 100
Номинальное напряженне питания постоянного тока, В 220
Угол сдвига фаз между током и напряжением, при котором достигается максимальная чувствительность, град:
реле активной мощности (мннимальное или максимальное) . . . . . 0±5
максимальное реле реактивной мощности . . . . . 90±5
Номинальная частота, Гц . . . . . 50 или 60
Диапазон ступенчатого изменения уставок по мощности при угле максимальной чувствительности и напряжении, равном $100/\sqrt{3}$:
для реле РСМ13-11 ($I_{ном}$ = 1 А), Вт(вар) . . . . . 2÷100
для реле РСМ13-18 ($I_{ном}$ = 5 А), Вт(вар) . . . . . 10÷500
Ступень дискретного изменения уставок:
для реле РСМ13-11 ($I_{ном}$ = 1 А), Вт(вар) 2
для реле РСМ13-18 ($I_{ном}$ = 5 А), Вт(вар) 10
Время срабатывания реле сопротивления, с 0,075
Количество контактов исполнительной части 6

Коммутационная способность контактов выходного реле при напряженни от 24 до 250 В в цепях постоянного тока с постоянной времени нндуктивной нагрузки не более 0,02 с и в цепях переменного тока прн коэффицненте мощности не менее 0,4 соответствует следующнм значениям:

Отключаемая мощность:
при постоянном токе, Вт, не более 30
при переменном токе, В·А, не более 250
Ток срабатыванння, А, не более:
при постоянном токе 1
при переменном токе 2
Ток включения, А, не более 3
Продолжительность перетекания указанного тока включения, с, не более 10
Потребляемая мощность прн номннальных значениях тока и напряжения, не более:
в цепях напряження переменного тока, В·А на фазу 2
в токовых цепях переменного тока, В·А на фазу 1
в цепях напряжения оператнвного постоянного тока, Вт 45
Масса блока, кг, не более 1,3

Значения механических воздействий не должны превышать: ускорений 10 м/с^2 в днапазоне частот от 16 до 100 Гц и 30 м/с^2 в диапазоне частот от 5 до 15 Гц, многократных ударов длительностью от 2 до 20 мс с ускорением до 3 Ом/с^2.

Электрнческая изоляция реле в состоянии поставки должна выдержнвать в течение 1 мнн без пробоя и перекрытия по поверхности испытательное напряжение 2000 В переменного тока частотой 50 Гц. Разобщающиеся в процессе работы контактные части реле должны в течение 1 мнн выдерживать испытательное напряжение 500 В переменного тока частотой 50 Гц. Прн повторных нспытаниях испытательное напряжение должно составлять 90 %, а после испытаний на коммутационную нзносостойкость 75 % указанных значений.

Реле ложно не срабатывает при воздействнн высокочастотных помех, имеющих:

форму затухающих колебаннй частоты 1 мГц с допустимым отклонением ±10 %;

модуль огибающей, уменьшающийся после 3÷6 пернодов на 50 % относительно максимального значения;

частоту повторения импульсов 400±40 Гц.

Внутреннее сопротивление источника высокочастотного сигнала должно быть 200±20 Ом, а амплитудное значение первого импульса при пронзвольной схеме подключения источнnка высокочастотного сигнала к реле — 2,5 кВ ±10 % и 1 кВ ±10 % при поперечной схеме подключения.

Реле ложно не срабатывает при снятии, подаче и кратковременном исчезновении напряжения питания длительностью до 50 мс. При этом значение мощности, поданной к реле, должно быть не менее 1,15 значения уставки по мощности срабатывания для реле мощности минимального и не более 0,85 для реле мощности максимального.

Все характеристики без специальных оговорок соответствуют температуре окружающего воздуха 20±5 °С, отиосительной влажности 80 % и номнальной частоте переменного тока.

Коэффициент возврата не более 1,2 для минимального реле и не менее 0,85 — для максимального.

Реле длительно выдержнвает входной ток и напряжение, а также напряжение питания, равные 1,05 номинальных значений при температуре окружающей среды 55 °С и 1,1 номинальных значений при температуре окружающей среды 40 °С.

Реле в течение 1 с выдерживает входной ток, равный тридцатикратному от номинального значения.

Реле выдерживает импульсные перенапряжения с амплитудой от 4,5 до 5 кВ между входными н выходными цепями, а также между нимн и металлическими частями корпуса; длительность фронта импульса 1,2 мкс ±30 %; длительность среза импульса (50+10) мкс; количество импульсов — по три разной полярности; длительность интервала между импульсами не менее 5 с.

Основная погрешность значення мощностн срабатывания при угле максимальной чувствительности и входным напряжением, равным $100\sqrt{3}$ В, не более ±5 % уставкн по мощности.

Относительная дополнntельная погрешность по мощности срабатывания при измененни входного тока в пределах от 0,02 до 1,73 номинального и входного напряженя в пределах от 0,2 до 1,0 номинального при угле максимальной чувствительности не более: ±5 % при уставках от 70 до 500 Вт и ±10 % прн уставках от 10 до 60 Вт для реле РСМ13-18 ($I_{ном}$ = 5 А); ±5 % при уставках от 14 до 100 Вт н ±10 % при уставках от 2 до 12 Вт для реле РСМ 13-11 ($I_{ном}$ = 1 А).

Относительная дополнntельная погрешность мощности срабатывания реле при измененнн частоты входного тока и напряжения на 3 Гц от номинальной не более ±5 % значения мощности срабатывания, измеренной на номннальной частоте.

Относительная дополнительная погрешность мощности срабатывания при изменении температуры окружающей среды в пределах от —40 до +55 °С по отношенню к среднему значению мощности срабатывання, измеряемому при температуре 20±5 °С не более: ±1,5 % на каждые 10 °С при уставках от 70 до 500 Вт и ±6 % на каждые 10 °С прн уставках от 2 до 12 Вт для реле типа РСМ13-11.

Относнтельная дополнntельная погрешность мощности срабатывания реле при изменении напряжения питания от 0,8 до 1,1 номннального значения не более ±3 % среднего значення мощности срабатывания, измеренной прн номинальном напряженин пнтания; допускается налнчне периодической составляющей частоты 100 Гц в напряжении постоянного тока не более 6 %.

Время срабатывания миннмального реле не более 0,06 с при скачкообразном изменении мощности на входных зажимах от значения, равного 1,15 по отношению к мощности срабатывания, до нуля.

Время срабатывания максимального реле не более 0,1 с при скачкообразном изменении мощности на входных зажимах от нуля до значения, равного 1,15 мощности срабатывания не превышает 0,1 с.

Время срабатывания минимального реле при скачкообразном измененин мощности на входных зажимах от 0,9 до 1,15 мощности срабатывания не превышает 0,07 с.

Время срабатывания максимального реле при скачкообразном изменении мощности на входных зажимах от 0,9 до 1,15 мощности срабатывання не превышает 0,07 с.

Зона работы реле не менее 85° в каждую сторону от угла максимальной чувствительностн.

Мощность, потребляемая токовой цепью при номинальном входном токе, не более 0,9 В·А; мощность, потребляемая цепью напряжения при номинальном входном напряженин, не более 1,2 В·А; мощность, потребляемая цепью питания прн номинальном напряжении питання, не более 20 Вт.

РЕЛЕ ТОКА С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ТИПА РТЗ-51

Предназначено для использования совместно с трансформаторами тока нулевой последовательности ТТНП в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защиты при замыканиях на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыкания на землю. Питанне цепей оператнвного тока реле осуществляется от источника постоянного тока напряжением 220 В или от нсточника переменного тока напряжением 110 В; предусмотрена возможность подключення к источнику постоянного напряжения 110 В. Реле выполнено на интегральных микросхемах КР140УД708. Предназначено для установки на вертикальную плоскость с отклоненнем не более 5° в любую сторону.

Технические характеристики реле

Максимальные габарнты, мм . . 152×66×194
Номннальный ток, А 0,1
Номинальное напряжение пнтания, В:
переменного тока 100
постоянного тока 220

Номинальная частота, Гц 50; 60
Пределы регулирования тока срабатывания, А . . . . . 0,02÷0,12
Время срабатывания при двукратном токе срабатывания, с, не более 0,06
Реле выдерживает в течение 1 с ток, А 60
Реле имеет замыкаемый контакт:
контакт способен коммутнровать электрнческне цепи:
напряжением, В 250
током, А 2,5
в цепн переменного тока с коэффициентом мощности не менее 0,4, В·А 250

в цепи постоянного тока с постоянной времени не более 0,02 с, Вт 30
Мощность, потребляемая на входе на минимальной уставке, В·А, не более . . 0,01
Мощность, потребляемая в цепи питания при минимальном напряжении, не более:
на переменном токе в длительном режиме, В·А 6,5
на переменном токе в режиме срабатывання, В·А 7,5
на постоянном токе, Вт 10
Масса реле, кг, не более 1,3

БЛОК РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТИПА БРЭ 2801

Применяется в качестве пускового или дистанционного органа в различных схемах релейной защиты и автоматики. Может использоваться для защиты линий 110+220 кВ. Блок выполнен на интегральных микросхемах в габаритах блока БУК-6 и содержит три реле сопротивлення, каждое из которых включено на линейное напряжение и разность фазных токов. Предусмотрена возможность переключения реле сопротивления блока с линейного напряжения на фазное и с разности фазных токов на фазный ток, компенснрованный током нулевой последовательностн. Максимальные габаритные размеры блока 389×214×267 мм. Основные технические параметры блока соответствуют ТУ 16-523.628-83:

Номинальный переменный ток, А 1,5
Номинальное напряжение переменного тока, В 100
Номинальная частота, Гц 50; 60
Номинальное напряжение оперативного постоянного тока, В 220; 110
Минимальные уставки по сопротивлению срабатывання, регулируемые в цепях тока, Ом/фазу . . . 1,25; 2,5; 5; 20
Исполнение по сопротивлению срабатывания, Ом:
для типа А . . . . . 5 (или 1);
для типа Б . . . . . 20 (или 4)
Коммутационная способность контактов выходных реле блока в цепях постоянного тока, Вт, не менее 30

Кроме перечисленных на базе различных микросхем разработаны реле направления мощности тнпов РМ11 и РМ12; реле разности частот типа РГР11, применяемые в схемах автоматики при синхронизации генераторов, включаемых на параллельную работу и др.

35.5. ДАТЧИКИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При эксплуатации систем автоматики и информационно-измерительной техники возникает необходимость в измерении и анализе различных физических величин. Зачастую требуется привести их к виду и форме, удобным для дальнейшей обработки, но не поддающимся непосредственному восприятию. Для этих целей служат датчики.

Электрический датчик — устройство, которое, подвергаясь воздействию некоторой, как правило неэлектрической, физической величины (перемещение, скорость, ускорение, давление, температура, влажность, освещенность, цвет, состав примесей и их содержание, частота колебаний и т. п.) вызывает изменение состояния электрической цепи (путем ее замыкания и размыкання, изменения одного из электрических параметров: R, L, C или генерации ЭДС) и выдает эквивалентный электрический снгнал (заряд, ток, напряжение и т.д.), являющийся функцией этой контролируемой величины [35.2+35.13]: $y = f(x)$, где x — входная контролируемая величина; y — выходной сигнал датчика.

В общем случае под сигналом понимают материальный носитель информацин. Электрический сигнал — это изменяющийся заряд, ток или напряжение, несущие информацию об измеряемой величине.

Различают две основные формы сигналов:

непрерывную в виде физического процесса; информация в нем определяется уровнем какого-либо информатированного параметра: тока, частоты, амплитуды, фазы и т.п.;

днскретную, коднрованную, прн которой информация заключена в числе элементов кода, их расположении во времени или в пространстве.

Датчики как составная часть систем автоматического регулирования характеризуются статическими и диннамическнмн показателями. Датчики должны иметь: высокую надежность, большой срок безотказной работы; высокую точность ($\delta\% = y/y_н \cdot 100\%$, т.е. выраженное в процентах относительное отклонение выходного сигнала от номинального его значения); стабильность и однозначность характеристик (отсутствне остаточного снгнала, зоны нечувствительности и гистерезиса) и их независимость от внешних воздействий (старение элементов схемы, нестабильность питающего напряжения и сопротивлення на выходе измерительного органа, влияние окружающей среды и т.п.); высокую восприимчивость (способность реагировать на незначительные отклонения измеряемой величины); высокую чувствительность $s = dy/dx$, которая не должна зависеть от значения и закона изменения контролируемой величнны; высокое быстродействне, скорость преобразования измеряемой величины должна обеспечнвать надежное слежение за ее изменениями; высокую эффективность (максимум выходного сигнала при минимуме входной потребляемой энергии); минимальные статические и динамические погрешности; минимальную реакцию (сам датчик не должен искажать процессы, за которыми он призван следить и контролировать); минимальную пульсацию выходного сигнала (датчик постоянного тока) н минимальные колебания фазы выходного напряжения (датчик переменного тока); минимальные габариты, массу н стоимость; простую конструкцию, предусматривающую свободную компоновку с дру-

гими аппаратами и элементами; не оказывать влияния на обслуживающий персонал и работу близлежащих аппаратов и устройств.

Датчики подразделяются на две большие группы:

1) пассивные, или параметрические;

2) активные, или генераторные.

К первой группе относятся датчики, которые не в состоянии самостоятельно создавать на выходе электрический сигнал, для их работы необходим источник питания, а датчик под действием контролируемой величины лишь меняет свои внутренние параметры, что в конечном итоге и вызывает изменение выходного сигнала. Активные датчики не нуждаются в постороннем источнике питания, они сами под воздействием измеряемой величины генерируют электрический сигнал, как правило в виде ЭДС. Ниже приведена возможная классификация пассивных и активных датчиков.

Пассивные датчики: резистивные; индуктивные; емкостные.

Активные датчики: индукционные; термоэлектрические; пироэлектрические; на фотоэффекте (внешнем или внутреннем); фотоэлектромагнитные; пьезоэлектрические; Виганда; Холла; магнитострикционные; на твердых электролитах.

Датчики также могут классифицироваться по:

физическим явлениям, лежащим в основе их работы (закон электромагнитной индукции, эффект Холла, закон Нернста, магнитострикция, изменение электрической емкости при изменении влажности и т.п.);

наличию подвижных элементов (электромеханические) или их отсутствию (статические);

принципу действия, т.е. по тому, как именно используется физическое явление, прямо или косвенно (например, в термомагнитных датчиках температура влияет на магнитную проницаемость магнитопровода, это приводит к изменению индуктивности устройства, что в итоге сказывается на токе в цепи или на напряжениях на отдельных ее участках);

устройству, т.е. по тому, как принцип действия реализуется в конструкции (например, оптический датчик содержания солей в растворе, акустический датчик шума);

контролируемой величине: давлению, влажности, ускорению, углу поворота и т.п.;

назначению, объекту регулирования: температуре печи, частоте вращения двигателя, скорости перемещения дуги;

виду передаточной функции: безынерционные, инерционные, с запаздыванием и т.п.

ПАССИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Резистивные датчики обычно используются для контроля линейных и угловых перемещений, давления, температуры и т.д. [35.2, 35.3]. Принцип их действия основан на изменении активного электрического сопротивления под влиянием измеряемой величины. В зависимости от включения (как реостат или потенциометр) выходными параметрами будут ток или напряжение (рис. 35.12). В резистивных электромеханических датчиках по мере изменения координаты x их подвижного элемента, механически связанного с рабочим механизмом, будет эквивалентно меняться и выходной сигнал.

Многие резистивные датчики относятся к безынерционным звеньям; их чувствительность обычно лежит в пределах от 3 до 5 В/мм. Резистивные датчики сопротивления могут быть каркасными и бескаркасными. Бескаркасные могут быть жидкостными или электролитическими. Для измерения угла поворота резистивные датчики имеют подвижный элемент, отклоняющийся на угол α (см. рис. 35.12 и 35.13).

В каркасных датчиках (рис. 35.12, *а—г*) в качестве сопротивления используются проволока с высокоомным удельным электрическим сопротивлением, слой полупроводника или пленка металла. Электролитические датчики (рис. 35.12, *д—и*) могут использоваться только в цепях переменного тока из-за разложения электролита и поляризации электродов при постоянном токе; их сопротивление сильно зависит от температуры. По указанным причинам наиболее предпочтительными являются дифференциальные схемы их включения. Выходной сигнал датчиков может быть в виде тока I_x (рис. 35.12, *а*) или напряжения U_x.

Вид характеристики в значительной степени зависит от значения сопротивления нагрузки. Например, для схемы по рис. 35.12, *б* выходное напряжение U_x выражается следующим равенством:

$$U_x = \frac{U(x/l)}{1+\frac{R}{R_н}[x/l)-(x/l)^2]}.$$

В зависимости от вида характеристики резистивные датчики могут быть линейными и нелинейными. Иногда преднамеренно характеристике придают специальный нелинейный вид. Для этого используют фигурные каркасы (рис. 35.13, *а* и *б*), шунтируют отдельные участки (рис. 35.13, *в—д*) или выполняют их из материалов с различным удельным электрическим сопротивлением. На рис. 35.13, *а*, *б* представлены принципиальные схемы резистивных датчиков с фигурными каркасами. Каркасы имеют толщину b. Их высота h зависит от координаты x. При перемещении движка на длину dx происходит изменение сопротивления датчика на dR. Общее изменение сопротивления R датчиков от положения x их движка показано под соответствующими эскизами датчиков. В датчиках (рис. 35.13, *в*, *г*) каркасы не фигурные, но тем не менее эти датчики также позволяют получить нелинейную характеристику. Последнее достигается за счет шунтирования отдельных участков датчиков вспомогательными резисторами (рис. 35.13, *в*) или за счет закорачивания этих участков перекатывающимся фигурным контактом (рис. 35.13, *г*). В датчике, показанном на рис. 35.13, *д*, за счет конструктивных особенностей при повороте движка на угол α выходной сигнал изменяется по закону синуса или косинуса.

В промышленности используются различные типы резистивных датчиков: ПЛ, ДУП и др.

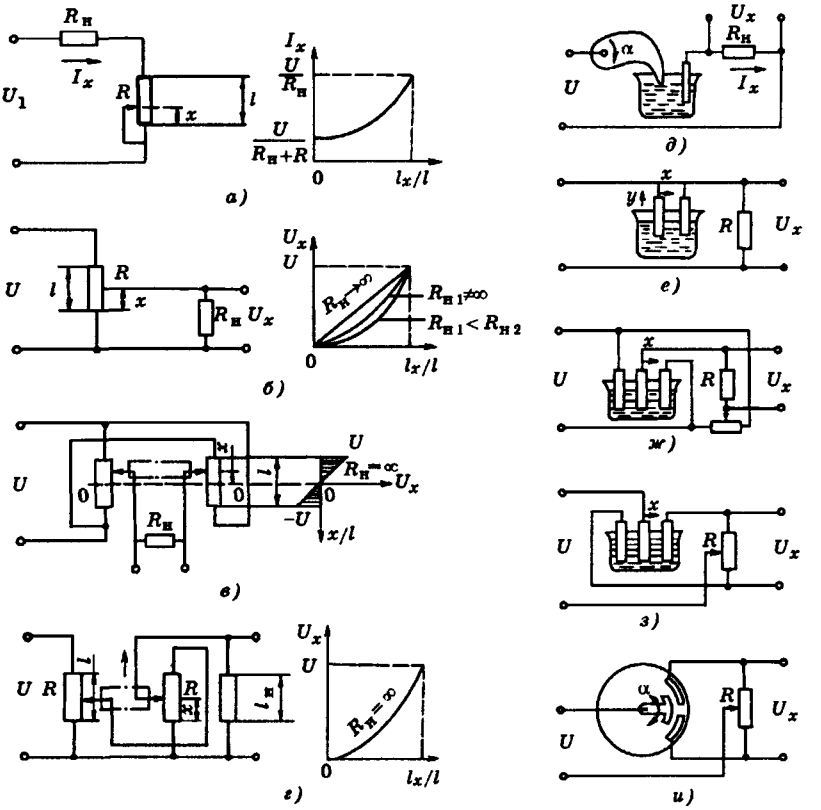


Рис. 35.12

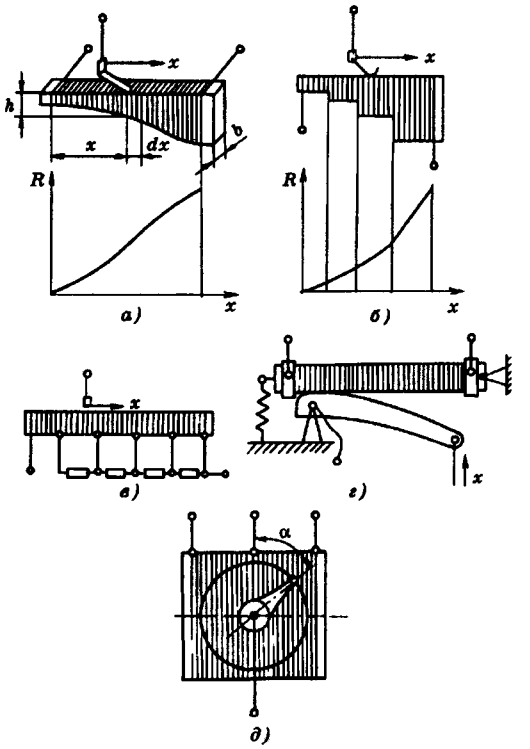


Рис. 35.13

Таблица 35.6. Основные показатели датчиков серии ПЛ

Технические данные	ПЛ-1	ПЛ1-2	ПЛ2-1	ПЛ2-2
Необходимый крутящий момент, Н·нм	0,25	0,40	1,0	2,0
Мощность рассеяния, Вт	0,40	—	5	—
Допустимая нелинейность характеристики, %	0,3	0,5	0,1	0,2
Сопротивление, Ом	500 750 1000 1500 10 000	1000 1500 2000 3000 10 000 15 000	2000 3000 5000 7500 20 000 30 000	7500 15 000 20 000 40 000

1. В табл. 35.6 приведены технические данные резистивных датчиков углового перемещения серии ПЛ. Для работы датчика к нему необходимо приложить определенный крутящий момент. Характеристика датчиков близка к линейной, отклонение от линейности не превышает 0,5 %. Максимальное число оборотов оси не должно превышать 10^5 об/мин. Срок службы 300 ч. Потребляемая (рассеиваемая) мощность не превышает 5 Вт.

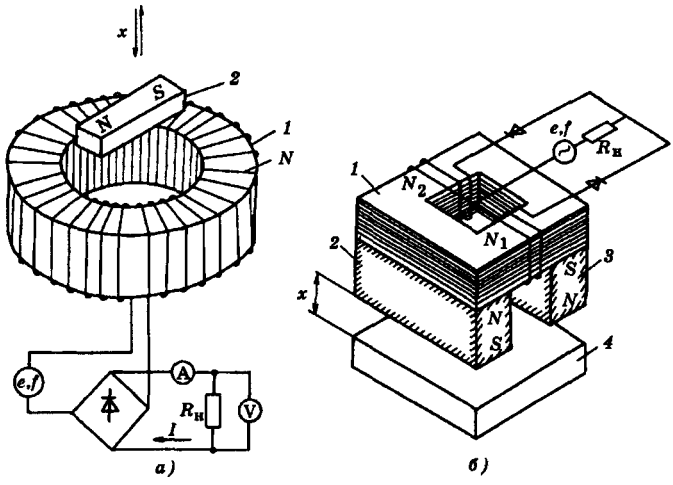


Рис. 35.14

2. На гидравлических кривошипных исполнительных приводах СПКГ используются резистивные датчики поворота типа ДУП-1; для дистанционной передачи угла поворота — датчикн серии МУ, а для измерения угловых перемещений — датчики типов ДК-3 и ГДК-52.

3. Датчики на магнитных усилителях в основе своей состоят из магнитопровода и обмоток. Они в течение одного полупериода питающего напряжения резко изменяют сопротивление цепи, осуществляя включение и выключение тока нагрузки, как обычные ключи [35.10].

Принципиальные схемы датчиков линейных перемещений на магнитных усилителях приведены на рис. 35.14. Первый из них (рис. 35.14, *а*) представляет собой дроссельный магнитный усилитель, работающий в режиме вынужденного намагничивания. Если x = const, то ток, протекающий по резистору $R_н$, будет постоянным и датчик работает, как стабилизатор среднего значения тока в нагрузке. При x = var происходит изменение тока I и напряжения U на резисторе $R_н$. Чем дальше удален магнит *2* от магнитопровода *1*, тем меньше показания амперметра и вольтметра. Ввиду известной стабильности характеристики управления дроссельного магнитного усилителя ток в резисторе будет мало зависеть от напряжения e питания, частоты сети f и сопротивления $R_н$. В таких датчиках (при неизменном сопротивлении $R_н$) удается обеспечить стабильность показаний приборов с точностью ±0,25 % при изменении напряжения питания на ±25 % [35.10].

Датчик линейных перемещений (рис. 35.14, *б*) — это магнитный усилитель с самоподмагничиванием, управляемый полем постоянных магнитов *2* и *3*. При перемещении ферромагнитной пластины *4* изменяется магнитное состояние участков магнитопровода *1*, на которых размещены рабочие обмотки N_1 и N_2. За счет этого изменяются угол насыщения и как результат среднее напряжение на резисторе $R_н$.

4. Резистивные датчики на герконах являются дискретно работающими пассивными датчиками [35.5, 35.6, 35.9, 35.11÷35.13]. Например, для работы в станках с программным управлением и других автоматизированных системах для выдачи информации о занимаемом положении деталей и узлов в любой момент времени используются датчики на герконах типа ПГК. Они имеют до 16 выходных каналов; коммутируемая мощность каждого канала до 30 Вт; габаритные размеры 162×142×75 мм; масса не превышает 1,1 кг [35.5, 35.11].

5. Для измерения угловых перемещений может использоваться датчик типа ДФ-1. Он предназначен для работы в системах автоматнки машин и станков с программным управлением. Диапазон рабочих температур 1÷45 °С. Номинальное напряжение питания постоянного тока 12 В; число каналов два; максимальный ток нагрузки каждого канала 30 мА; напряжения выходных каналов: "нуль" — не более 0,5 В, "единица" — не менее 9 В; потребляемая мощность не более 2,4 Вт; масса не более 0,25 кг.

Индуктивные датчики предназначены для измерения перемещений и усилий. Принцип их действия основан на изменении индуктивности под влиянием контролируемой величины; выходиой сигнал и его фаза зависят от положения подвижного элемента [35.5, 35.6, 35.8, 35.9]. Эти датчики могут работать лишь с источниками переменного тока. По сравнению с резистивными датчиками они менее чувствительны к колебаниям температуры, но весьма чувствительны к перепадам частоты f и значения питающего напряжения U, обладают повышенной реакцией. Принципиальная схема нереверсивного индуктивного датчика линейных перемещений с переменным немагнитным зазором δ показана на рис. 35.15. Конструктивно он подобен П-образному электромагнитному реле с прямоходовым движением якоря. На магнитопроводе *1* расположена обмотка *2*, к которой подается напряжение U. Выходной сигнал U_{x1} снимается с балластного сопротивления $Z_б$. Для гальванической развязкн входной и сигнальной цепей может использоваться дополнительная обмотка *2'*, с которой снимается сигнал U_{x2}.

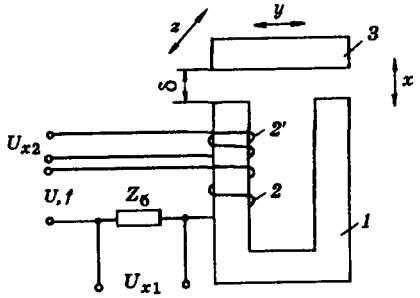


Рис. 35.15

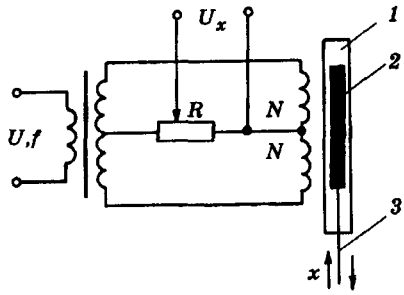


Рис. 35.16

Оба сигнала U_{x1} и U_{x2} могут сниматься одновременно. При неизменном зазоре δ выходные сигналы будут изменяться эквивалентно изменениям координат x, y или z якоря *3* (рис. 35.15).

Ниже рассматриваются некоторые типы индуктивных датчиков.

1. Индуктивные датчики типа ИД состоят из неподвижной обмотки, заключенной в стальной магнитопровод, и перемещающегося внутри обмотки якоря. При перемещении якоря изменяются индуктивность обмотки и ее полное электрическое сопротивление переменному току. Технические данные датчиков серии ИД приведены в табл. 35.7. Их масса равна 1,4 кг; ход якоря при изменении полного сопротивления от минимального до максимального составляет 65 мм.

2. Датчики серии ИКВ построены на принципе преобразования линейного перемещения движущегося объекта в изменение индуктивного сопротивления обмотки со стальным сердечником. Их принципиальная схема включения показана на рис. 35.16, а основные данные приведены в табл. 35.8. Датчик состоит из корпуса *1*, внутри которого перемещается плунжер (сердечник) *2*, связанный посредством штока *3* с рабочим механизмом. При перемещении штока *3* вверх или вниз изменяется индуктивное сопротивление обмоток *N*. Сигнал снимается с небольшого резистора *R*. Для уменьшения остаточного выходного сигнала U_x и для определения направления движения x датчики ИКВ-30 включаются попарно по дифференциальной схеме (рис. 35.16).

Индуктивные датчики используются в дифференциальных манометрах типа ДММ для измерения расхода жидкостей. Максимальная крутизна их выходной характеристики достигает в среднем 100 мВ/Па; диапазон перепада давлений $(0{,}60 \div 60)10^{-4}$ Па; среднее значение постоянной времени 0,3÷0,45 с.

3. Индуктивный датчик перемещений типа Э применяется в дистанционных манометрах; напряжение питания 127 В, 50 Гц; ход сердечника 30 мм.

4. Датчики размеров типа БВ-908 и БВ-844 работают в комплексе с записывающим устройством типа БВ-662 и предназначены для контроля размеров деталей в машиностроении. Разрез датчика типа БВ-844 дан на рис. 35.17. На рисунке показаны габаритные размеры датчика и его основные элементы. Датчик состоит из ферромагнитных подвижных дисков *1*, жестко связанных с измерительным стержнем *2*. При изменении контролируемой величины происходит перемещение стержня, наблюдается изменение индуктивности и индуктивного сопротивления обмоток *3* и *4* датчика, включенных по дифференциальной схеме.

5. Датчики углового перемещения типов ОДУ (однокоординатные) и ДДУ (двукоординатные) применяются в гироскопических устройствах для измерения угла прецессии; их данные указаны в табл. 35.9. Чувствительность таких датчиков при 10 кОм находится в пределах 0,05÷ 0,5 В/град. Статическая характеристика в пределах рабочего

Таблица 35.7. Основные показатели датчиков положения серии ИД

Технические данные	ИД-31УЗ	ИД-32УД	ИД-33УЗ
Синусоидальное напряжение питания, В	10	17	13
Полное максимальное сопротивление обмотки, Ом, не более	70	550	100
Полное минимальное сопротивление обмотки, Ом, не менее	5,5	65	9
Активное сопротивление обмотки, Ом	2,7	17	4
Номинальный ток, А	1,4	0,26	0,65

Таблица 35.8. Основные показатели датчиков серии ИКВ

Технические данные	ИКВ-100	ИКВ-22 (ИКВ-22Т)	ИКВ-30
Синусоидальное напряжение питания, В	127	24	127
Полное сопротивление обмотки датчика без якоря, Ом	295	—	40
Полное сопротивление обмотки датчика с якорем, Ом	570	—	68
Воздушный зазор между магнитопроводом и якорем, мм	5÷30	6,4	6,5

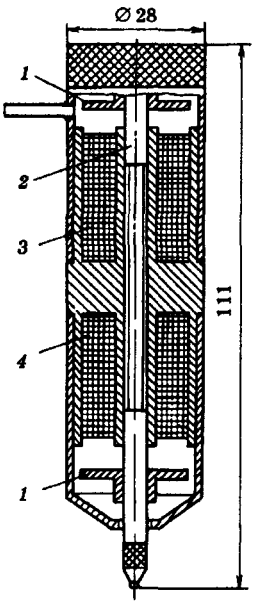


Рис. 35.17

диапазона работы линейная, погрешность не превышает 3 %.

6. Датчики магнитного поля на герконах могут использоваться для измерения и анализа внешних созданных не индуктивной обмоткой магнитных полей и любых других физических величин, приводящих к изменению магнитного поля вокруг геркона [35.5, 35.6, 35.12, 35.13].

Трансформаторные датчики являются разновидностью индуктивных датчиков. Они содержат магнитопровод *1* и две или более подвижные или неподвижные обмотки, некоторые из которых могут быть короткозамкнутыми (рнс. 35.18). Работа этих датчиков основана на изменении магнитной связи, взаимной индуктивности между первичной (входной, возбуждения) обмоткой *2* с числом витков $N_в$

Таблица 35.9. Основные показатели датчиков угловых перемещений серии ДУ

Технические данные	ОДУ-40	ОДУ-60а (ИКВ-22Т)	ДДУ-90
Рабочий угол перемещения, град	2,5	2,5	2,0
Максимальный угол поворота, град	6	6	6
Нулевое остаточное напряжение, В	0,033	0,002	0,01
Реактивный момент, $\times 10^{-6}$ Н·м	4	4	5
Напряжение питания, В	40	9; 7	40
Частота питающего напряжения, Гц	500	500; 1000	500

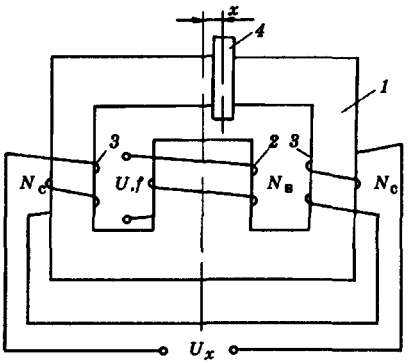


Рис. 35.18

и вторичными (выходными, сигнальными) обмотками *3* с числом витков N_c, вызванном воздействием контролируемой величины.

Принципиальная схема датчика линейных перемещений с короткозамкнутым витком (экраном) показана на рис. 35.18. При нейтральном расположении экрана *4* в силу полной симметрии системы магнитный поток, создаваемый обмоткой *2*, поровну распределяется в левую и правую части магнитопровода *1*. ЭДС, наведенные этими потоками в сигнальных обмотках *3*, равны между собой и направлены встречно. В итоге результирующий выходной сигнал U_x равен нулю. При смещении экрана *4* с нейтрали на некоторое расстояние *x* потоки в левой и правой частях системы будут различными, появится выходной сигнал, эквивалентный смещению на расстояние *x* экрана. Датчик прост и надежен, но чувствителен к колебаниям частоты и амплитуды питающего напряжения.

Для измерения расходов и давлений газов используются дифференциальные тягометры ДТ-2 (рис. 35.19). В корпусе *1* из немагнитного материала находится ферромагнитный плунжер *2*, связанный с центром мембраны *3*. Перемещение плунжера *2* под воздействием разностн давлений в верхней и нижней полостях корпуса вызывает изменение магнитной связи между первичной обмоткой N_1 и дифференциально включенными вторичными обмотками N_2 и N_3. В результате выходное напряжение U_x меняется пропорционально разности давле-

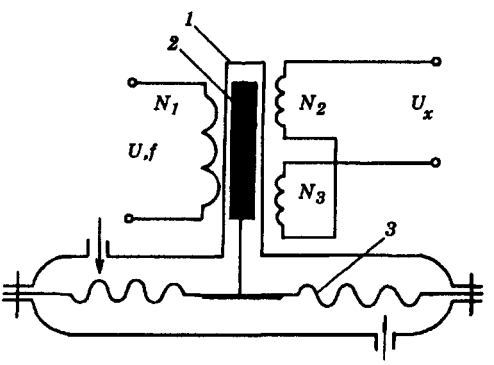


Рис. 35.19

ний в полостях. Передаточная функция датчика $W(p) = k/(1+pT)$, где постоянная времени $T \approx 0{,}1$ с; пределы изменения перепадов давлений от нуля до 3000 Па; крутизна выходной характеристнки 1,6÷ ÷10 мВ/Па.

Трансформаторные датчики нспользуются для измерения механических сил и перемещений. Они надежны в эксплуатации, имеют значительный выходной сигнал, который без усиления может использоваться в последующих элементах схемы. К недостаткам можно отнести повышенные габариты, массу, инерционность и реакцию.

Емкостные датчики конструктивно просты, надежны, обладают малой массой и габаритамн, малой инерционностью и высокой чувствительностью; используются для измерения небольших перемещений, влажности, давления. Емкость датчнка при внешнем воздействии может меняться за счет изменения зазора между электродами и их площади, механической деформации диэлектрика и его свойств. Емкость датчиков обычно мала (10÷100 пФ), поэтому желательно работать на повышенных частотах. Чувствительность датчика зависит от конструкции, схемы включения и параметров, определяющих значение емкости. Конструктивно емкостные датчики подобны электролитическим резистивным датчикам. Рассмотрим некоторые из них.

1. Емкостные датчики серии ДЕ применяются для измерения линейных размеров деталей и контроля движущихся тел с диэлектрической проницаемостью, отличающейся от проницаемости вакуума. Напряжение питания 220 В (50÷ 500 Гц); потребляемая мощность не более 14 Вт; постоянное напряжение выходного сигнала 12 В; изменение емкости входной цепи датчика, необходимое для его срабатывания, не менее 7 пФ; масса датчика 1,4 кг.

2. Для непрерывного измерения уровня жндких легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных и агрессивиых сред нспользуются датчики серии ЭИУ-1В. Их принцип действия основан на изменении емкости системы "земля — изолированный электрод" при погружении его в жидкость. Диапазон изменения уровня от 0 до 5 м, напряжение питания 220 В; частота 50 Гц; диапазон рабочих температур от —100 до + 105 °С.

3. Датчики серии ЕДО предназначены для измерения пульсирующих и импульсных давлений воздуха и других газов; работают на принципе преобразования давления, приложенного к мембране, в изменение емкости. Верхний предел изменения давления 0,08÷0,1 МПа при частотном диапазоне работы от 10 до 1840 Гц (в зависимости от типа датчика и требуемой точности).

4. Малогабаритные датчики серии ДК-М1 и ДК-М2 используются для измерения частоты и амплитуды пульсации давления на лопатках турбин. Диапазон рабочих давлений 0,05÷0,065 МПа; используются в комплекте с измерительным устройством типа ЕИ-5М.

5. Емкостные датчики магнитного поля на герконах в отличие от индуктивных датчиков на герконах не имеют индуктивной обмотки. Сигнал в них снимается с выводных концов геркона. Датчнки служат для контроля параметров, прнводящих к измененню магнитного поля вокруг геркона [35.5].

АКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Индукционные датчики являются наиболее распространенным классом активных датчиков как по заложенным в них принципам действия, так и по назначению и конструктивному воплощению. Они могут быть постоянного и переменного тока (однофазные и многофазные) и обычно используются для контроля частоты вращения, углового ускорения, угла поворота, скорости и ускорения линейного перемещения. Эти датчикн могут выдавать значительные выходные сигналы как по напряжению, так и по мощности, в широком диапазоне изменения контролируемой величины имеют практически линейную характеристику, хорошо противостоят кратковременным механическим и электрическим перегрузкам, просты в обращении.

1. Датчик частоты вращения (тахогенератор) по конструкции и принципу действия практически ничем не отличается от традиционных генераторов (см. рис. 30.2). Выходные ЭДС и частота пропорциональны частоте вращения вала датчика.

2. Датчик углового ускорения подобен индукционному реле с барабанчиком или двухфазному двигателю с полым ротором (см. рис. 30.2). Если одну из обмоток подключить к источнику постоянного напряжения и вращать вал датчика с переменной частотой, то на зажимах второй обмотки будет индуцироваться ЭДС, пропорциональная угловому ускорению.

Фотоэлектронные датчики могут использоваться в качестве индикаторов углового перемещения. Так, поворотные фотоэлектронные путевые выключатели серии ВПФ-11 предназначены для выдачи сигналов в систему автоматического управления, функционально связанную с углом поворота вала механизма, и используются в бесконтактных системах автоматического управления, построенных, например, с использованием элементов УБСР-ДМ. Они могут обеспечить работу небольших контактных реле типа РПУ-2 или герконовых реле.

Датчик магнитного поля Виганда состоит из предварительно механически обработанной проволоки из сплава "викалой" (10% V, 52% Co и 38% Fe) диаметром примерно 0,3 мм. Этой проволокой наматывают сигнальную обмотку N_c длиной 15 мм, имеющую примерно 1300 витков. Если такую обмотку поместить в магнитное поле, то при превышении определенного значения напряженностн H магнитного поля направление намагничивания спонтанно меняется [35.2]. В результате на зажимах катушки появляется нмпульс напряженнн e_c длнтельностью от 15 до 50 мкс и амплитудой до 5 В.

К достоинствам датчика следует отнести следующее: отсутствие постороннего источника питания; большой выходной сигнал (несколько вольт); широкий температурный диапазон прнменения (от —196 до +175 °С); искробезопасность; конструктивная защищенность от коротких замыканий; амплитуда и длительность импульсов не зависят от скорости из-

Таблица 35.10. Основные показатели датчиков серии ВЕ-192

Технические данные	ВЕ-192	ВЕ-192-1
Колнчество входных каналов (прямых и инверсных)	6	4
Количество пернодов выходных сигналов за один оборот вала	1000; 1024	100
Частота формирования импульсов, кГц	До 150	До 0,2
Угловая погрешность, с: предельная	300	600
при Z = 2500 Ом	150	—
Габаритные размеры (диаметр×высоту), мм	50×63	105×125
Масса, кг	0,3	0,75

менения магнитного поля. Последнее позволяет использовать подобные датчики как датчики частоты вращения при скоростях, близких к нулю.

Помимо рассмотренных выше имеются датчики серий ВЕ-192 и ДС. Датчик угловых перемещений серии ВЕ-192 предназначен для использования в системах автоматического регулированнн станков и для информационной связи по положению между исполнительными механизмами станка и устройством числового программного управления — УЧПУ (исполнение ВЕ-192), а также для штурвала управления приводом подачи и корректировки программы металлорежущих станков с УЧПУ (исполнение ВЕ-192-1). Основные данные датчика приведены в табл. 35.10. Форма выходных сигналов прямоугольная.

Бесконтактные датчики серии ДС преобразуют частоту вращения вала в последовательность прямоугольных импульсов, частота которых меняется пропорционально частоте вращения вала.

Технические данные датчика

Диапазон частоты вращения вала датчика, Гц . . . . . 0÷100
Количество импульсов выходного напряжения за один оборот вала датчика 120
Номинальное напряжение питания постоянного тока, В 15
Потребляемая мощность, Вт, не более 1,7
Масса, кг, не более 0,4
Колнчество фиксируемых положений вала 2
Ресурс прн частоте не более 167 Гц, включения . . . . . $3 \cdot 10^6$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

35.1. Шоффа В.Н. Герконы н герконовые аппараты: Справочник. М.: Изд-во МЭИ, 1992.

35.2. Виглеб Г. Датчики. М.: Мир, 1989.

35.3. Датчики измерительных систем. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др. В 2-х кн. М.: Мир, 1992.

35.4. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. М.: Энергоатомиздат, 1987.

35.5. Коробков Ю.С., Флора В.Д. Электромеханические аппараты автоматики. М.: Энергоатомнздат, 1991.

35.6. Флора В.Д., Коробков Ю.С. Электромеханические аппараты автоматикн: Сборник вопросов, задач и упражнений. Киев: Учебно-методнческий кабинет высшего образования, 1992.

35.7. Гальваномагнитные преобразователи в измернтельной технике / В.В. Бройко, И.П. Гринберг, Д.В. Ковальчук и др. М.: Энергоатомиздат, 1984.

35.8. Азанов В.А. Датчнки и преобразователи. М.: Моск. энерг. ин-т, 1982.

35.9. Коробков Ю.С., Флора В.Д. Удерживающне реле, реле с памятью, реле на ферридах и датчики перемещений и усилий. М.: Моск.энерг.ин-т, 1987.

35.10 Шопен Л.В. Бесконтактные электрнческие аппараты автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1986.

35.11. Выбор электрических аппаратов для электропривода, электрического транспорта н электроснабжения промышленных предприятий / Е.Г. Акимов, Ю.С. Коробков, А.В. Савельев, В.П. Соколов, А.А. Чунихин. М.: Изд-во МЭИ, 1990.

35.12. Коробков Ю.С., Хромов С.В. Особенности устройства и работы магнитоуправляемых контактов. М.: Изд-во МЭИ, 1992.

35.13. Коробков Ю.С., Хромов С.В. Особенности устройства и работы запоминающих магнитоуправляемых контактов. М.: Изд-во МЭИ, 1993.

Раздел 36

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ. СИСТЕМЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

СОДЕРЖАНИЕ

36.1. Применение электромагнитов и систем с постоянными магнитами 401
36.2. Методы расчета электромагнитов и систем с постоянными магнитами 402
36.3. Магнитные системы промышленных устройств 408
36.4. Источники магнитного поля для намагничивания и исследования магнитных материалов 412
36.5. Эталонные источники магнитного поля 415
Список литературы 416

36.1. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Электромагниты со стационарными магнитными полями и системы с постоянными магнитами классифицируются по выходному параметру и по целевому назначению.

По виду выходного параметра рассматриваемые устройства можно отнести к одной из трех групп:

1) воспроизводящие заданную топографию магнитного поля в ограниченном объеме;

2) создающие заданный магнитный поток в ограниченном объеме:

3) обеспечивающие заданный закон измеиения или значения сил взаимодействия между деталями.

По целевому назначению, даже если ие учитывать магнитные системы электрических машин и электрических аппаратов, которые рассмотрены в других разделах настоящего справочника, классификация получается довольно обширная. Отметим наиболее крупные области использования электромагнитов и систем с постоянными магнитами.

Магнитные удерживающие механизмы: грузоподъемные механизмы, магнитные плиты, патроиы, захваты.

Синхронные магнитные механизмы: магнитные муфты, редукторы, механизмы поступательного перемещения.

Фокусирующие магнитные системы электроиных, иоиных и подобиых им приборов, создающие однонаправленное, реверсивное, периодическое или объемное специальное распределение поля.

Магнитные сепараторы и смесители, служащие для отделения ферромагнитных частиц и перемешивания растворов, расплавов и др.

Магнитные системы электрофизических устройств: ЯМР-спектрографов и томографов, ускорителей частиц, МГД-установок.

Источники магнитного поля для намагничиваиия и исследования магнитных материалов, эталонные источники магнитного поля.

Состав и функциональное назначение деталей электромагнитов и систем с постоянными магнитами. По функциональному назначению элементы магнитиых систем принадлежат к одиой из следующих групп:

1. Первичные источники магнитного поля.
2. Магнитопроводы.
3. Концеитраторы магнитного потока.
4. Регулировочные элементы.
5. Стабилизирующие магнитные элементы.

К первичным источникам магнитного поля в электромагнитах относятся проводники с током, которые конструктивно выполияются в виде многовитковых катушек и обмоток. В системах с постоянными магнитами в качестве первичных источников поля выступают предварительно намагниченные посто - янные магниты, выполненные из магнитотвердых сплавов с высокой коэрцитивной силой $H_c > 20$ кА/м. В комбинированных магнитных системах оба вида источников используются совместно.

Магнитопроводы изготавливаются из магнитомягких материалов с высоким значеиием относительной проницаемости $\mu_r > 100$; обеспечивают передачу магнитного потока обычно в нерабочей части систем с минимальными потерями и затратами запасенной в первичных источниках поля эиергии.

Концентраторы магнитного потока служат для направлеиия и усиления магнитного поля в рабочей зоне устройства; изготавливаются из магнитомягких материалов с высокой индукцией насыщения, обычно $B_s > 2$ Тл, так как значение B_s определяет максимальный предел индукции в рабочей зоне, которого можно достичь при эффективном использовании магнитных материалов и эиергии первичных источников поля.

К регулировочным элементам относятся как детали конструкции, изготовленные из магнитомягких и магнитотаердых ферромагнитных материалов или диамагнетиков, так и подстроечные маломощные электрические катушки, которые предназначены для перераспределения магнитного потока и регулироваиия его уровия в небольших пределах с целью точной установки заданных параметров поля. Положеиие регулировочиых элемеитов и токи в подстроечных катушках подбираются при юстировке магиитной системы на заключительной стадии изготовления.

Стабилизирующие магнитные элементы примеияются в магнитных системах для стабилизации или задания необходимого закона изменения магнитного потока при изменении температуры. Для

этих целей используются термомагнитные шунты из магнитомягких материалов с сильной зависимостью магнитной проницаемости от температуры, а также постоянные магниты из набора магнитотвердых материалов с различными температурными коэффициентами намагниченности.

36.2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ И СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Магнитное поле существует в неограниченном пространстве и соответственно создается бесчисленным множеством источников — не только собственно рассматриваемым электромагнитом или системой с постоянными магнитами, но и всеми известными и неизвестными нам другими источниками. Конкретизация пространственного распределения поля связана с принятием различных по степени допущений и необходима при математическом описании поля. Применяются две степени приближения: либо задаются существенно упрощенной топографией поля в ограниченной области, либо анализируют асимптотическую модель поля. В первом случае последующий ряд логически связанных допущений позволяет свести расчет магнитной системы к анализу эквивалентной магнитной цепи [36.1—36.4]. Так как расчет магнитных цепей легко реализуется, то этот подход до сих пор остается наиболее распространенным, несмотря на невысокую и трудно оцениваемую точность расчета. Во втором случае решается краевая задача теории поля для некоторой модели магнитной системы, которая служит асимптотическим приближением пространственного распределения параметров поля [36.4—36.6].

Расчет сложных магнитных систем производится с минимальными допущениями на ЭВМ. Программное обеспечение ЭВМ позволяет учитывать реальную, часто трехмерную, конфигурацию деталей и весь диапазон магнитных свойств материалов. Базой для построения таких программ служит математическая теория поля.

Широко известны три универсальных численных метода решения краевых задач теории поля: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод интегральных уравнений (МИУ).

Для стационарного магнитного поля уравнения Максвелла имеют следующий вид:

$$\nabla\times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad \nabla\times \mathbf{B} = 0,$$

где $\mathbf{J}$ — вектор плотности тока; $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции; $\mathbf{H}$ — вектор напряженности магнитного поля; ∇ — дифференциальный оператор Гамильтона.

Так как индукция не имеет истоков, то всегда допустимы обозначения $\mathbf{B} = \nabla\times \mathbf{A}$, где $\mathbf{A}$ — векторный магнитный потенциал, и для него из первого уравнения Максвелла с учетом магнитной характеристики получаем нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\nabla\times \mathbf{A}\right) = \mathbf{J},$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

В области магнитной системы, где нет сторонних токов, $\nabla\times \mathbf{H} = 0$ и $\mathbf{H} = -\nabla\varphi$ является потенциальной функцией, где φ — скалярный магнитный потенциал. Используя второе уравнение Максвелла, получаем дифференциальное уравнение для φ:

$$\nabla(\mu_0\mu_r\nabla\varphi) = 0.$$

На границах раздела разнородных сред 1 и 2 справедливы условия непрерывности нормальных к границе составляющих вектора магнитной индукции и касательных составляющих вектора напряженности магнитного поля:

$$\mathbf{n}\mathbf{B}_1 = \mathbf{n}\mathbf{B}_2; \quad \mathbf{n}\times\mathbf{H}_1 = \mathbf{n}\times\mathbf{H}_2,$$

где $\mathbf{n}$ — единичная нормаль к поверхности.

Силовые взаимодействия в магнитном поле определяются по интегральной формуле

$$\mathbf{P} = \mu_0 \oint_{S_r} [(\mathbf{n}\mathbf{H})\mathbf{H} - 0{,}5\mathbf{n}\mathbf{H}^2]\,dS,$$

где интегрирование производится на поверхности S_r, охватывающей одну из взаимодействующих групп деталей магнитной системы; $\mathbf{H}$ — вектор напряженности поля на S_r; $\mathbf{P}$ — результирующая сила.

Метод конечных разностей. Основная идея МКР состоит в конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения в частных производных и последующем решении полученной системы нелинейных уравнений с ленточной матрицей [36.5]. На все исследуемое пространство накладывается сетка, и по значениям параметра поля в ее узлах строится разностный аналог дифференциальных операторов, что приводит к системе алгебраических уравнений относительно искомых параметров поля. Для анализа поля в нелинейной ферромагнитной среде используется интегральный аналог уравнений Максвелла.

Из условия $\nabla\mathbf{B} = 0$ следует

$$\frac{1}{\Delta V_j}\oint_{S_j}\mathbf{B}\,d\mathbf{S} \approx \frac{1}{\Delta V_j}\sum_{i=1}^{N} B_i\,\Delta S_i = 0.$$

При подстановке в это равенство функций $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$, задающих магнитные свойства материала, и применении конечно-разностной аппроксимации градиента скалярного потенциала на узлах сетки

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi \approx \|\mathbf{A}\|\cdot\|\varphi\|,$$

где $\|\mathbf{A}\|$ — матрица постоянных коэффициентов; $\|\varphi\|$ — матрица узловых значений потенциалов, получаем систему алгебраических уравнений

$$\sum_{i=1}^{N}\Phi_{ji}(U_{ji}) = 0,$$

где $\Phi_{ji}(U_{ji}) = f(\|\mathbf{A}_j\| \cdot \|\varphi_i\|)\Delta S_{ji}$ — поток через поверхность ΔS_{ji} i-й ячейки, образующей j-й объем ΔV_j.

Если область немагнитиая, то

$$\Phi_{ji} = \mu_0 \|\mathbf{A}_j\| \cdot \|\varphi_i\| \Delta S_{ji}.$$

При использовании МКР в разнородных средах возиикает необходимость "сшиваиия" иа граиицах, которое производится последовательиым решением внутренних и внешних задач с использованием условий непрерывности векторов поля на граиице раздела сред до получеиия устаиовившихся значений параметров поля. Кроме того, в МКР существует проблема виешней границы области исследований, так как этот метод требует построеиия сетки во всей области существования поля. Ограничение области осуществляется введением искусственной границы, на которой определяются граничиые значеиия параметров поля в процессе итерационного решения.

Метод конечных элементов. МКЭ базируется на том, что искомая непрерывная фуикция аппроксимируется дискретиой моделью, построенной иа множестве простейших функций в коиечном чнсле подобластей. Этот метод относится к вариационно-сеточному методу, состоящему в удовлетвореиии интегральному тождеству для рассматриваемой краевой задачи иа выбранном множестве кусочно-полиномиальных функций [36.5]. Вся область исследования разбивается иа ячейки (треугольные, четырехугольные и т.п.), в пределах которых распределение функции аппроксимируется простейшим полиномом независимо от соседиих ячеек. Требуемая гладкость распределеиия фуикции в области обеспечивается только за счет наличия у смежных ячеек общих узлов и общих значеиий функций в этих узлах. В результате поэлементного способа аппроксимации функций расчетные матрицы в МКЭ оказываются слабо заполнеиными, а вычислительные программы достаточио простыми.

В качестве интегральиого тождества используются различные эиергетические функциоиалы, обеспечивающие удовлетворение фуикцией исходным дифференциальным уравиением краевой задачи и граничным условием. Например, для стационарного магнитного поля часто применяют

$$\mathbf{F} = \int_V \left(\int_0^B \mathbf{H}\, d\mathbf{B} \right) dV - \int_V \mathbf{A}\mathbf{J}\, dV.$$

Алгоритм расчета по МКЭ включает следующие этапы:

1. Формулировка краевой задачи в терминах дифферепциальных уравнеиий.

2. Разбиеиие области исследоваиия иа конечные элементы.

3. Выбор интерполяционного полинома для отдельного элемента и получение кусочно-иепрерывной функции, определенной во всей области.

4. Выбор и обоснование интегральиого тождества. Составление системы уравнеиий, обеспечивающей выполиение интегрального тождества.

5. Решение системы уравнений относительио узловых значений функций.

6. Расчет необходимых параметров поля.

Сравиение МКЭ с МКР показывает преимущества МКЭ, состоящие в простоте расчета распределения поля в телах, составлеиных из иескольких материалов с различными свойствами. Сложная криволинейная область сравнительио просто аппроксимируется с помощью прямолинейных элементов или описывается более точно криволиниейными элементами. Не представляет труда изменение шага сетки элементов в областях с повышеииыми градиентами. Прииципиальиым иедостатком МКЭ, как и МКР, представляется иеобходимость введения сетки и проведения расчетов во всей области.

Метод интегральных уравнений. МИУ наиболее широко используется в настоящее время при аиализе трехмериых магнитных полей [36.6]. Уравиения весьма разиообразиы, но их объединяет то, что краевая задача формулируется в виде интегральиых уравнеиий относительно источников поля, распределеиных в ограничеиием пространстве: ферромагиитных деталей, проводников с током, границ исследуемой области. Математическая основа метода — теория потеициала, дающая одиозиачную трактовку краевой задачи в интегральиой и дифференциальной постановках. Так как уравнения строятся относительио источииков, а не искомых параметров поля, то расчет выполияется в два этапа: сначала определяем источники, а затем интересующие нас параметры поля. Различают два подхода к составлеиию иитегральных уравнеиий:

1) методы граничных интегральных уравнеиий (ГИУ);

2) методы пространственных иитегральных уравнеиий (ПрИУ).

Методы ГИУ более частные по отиошению к ПрИУ и подразумевают определенную идеализацию области исследования, например постоянство магнитной проницаемости ферромагнитных деталей. Последнее позволяет определить топографию поля через некоторые фиктивные источники: простые и двойные слои магнитиых зарядов, магнитных токов, магнитных моментов, распределениых только по границам разнородиых по магнитиым свойствам деталей. Такие источники играют роль "вторичиых" по отношеиию к "первичиым" источиикам — проводникам со стороиииим током и постояниым магнитам. Задача сводится к решеиию системы интегральиых уравнений Фредгольма второго или первого рода, получаемых из краевых условий и записанных относительно фиктивных источников:

$\sigma + \lambda_1 A_1(\sigma) = f_1$ — уравиеиие второго рода

либо

$\lambda_2 A_2(\sigma) = f_2$ — уравнение первого рода,

где σ — фиктивиые источиики поля; λ_1, λ_2 — постояиные коэффициенты, определенные свойствами граничащих сред; A_1, A_2 — линейные иитегральные операторы, действующие на граиицах разиородных сред и граиице области исследоваиия.

Методы ПрИУ [36.6] используются там, где не удается обойтись источниками на граиицах раздела

разнородных сред и где должны быть введены объемные источники. Такая ситуация возникает при учете реальных нелинейных свойств ферромагнитных материалов. ПрИУ записываются, как правило, относительно вектора намагниченности M и также могут иметь вид уравнений второго и первого рода, например:

$$\mathbf{H} = A_1(\mathbf{M}) + A_2(\mathbf{J}),$$

где $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ — магнитная характеристика материала; A_1, A_2 — линейные интегральные операторы, действующие соответственно в объеме магнитных сред и проводников со сторонним током.

Решение ПрИУ осуществляется сведением к системам алгебраических уравнений путем замены интегралов конечными суммами и последующим применением прямых или итерационных методов решения. В интегральных методах расчета весомым преимуществом выступает то, что решается система уравнений меньшей размерности, чем в МКР и МКЭ, но она имеет полностью заполненную матрицу и вычисление коэффициентов требует интегрирования. Последнее несколько осложняет расчет и вычислительный алгоритм.

Основную трудность при расчетах магнитных систем методом эквивалентных схем магнитных цепей представляет определение магнитных проводимостей, для которых имеются различные приближенные формулы [36.1—36.4]. Более эффективный и универсальный метод определения проводимостей базируется на численном решении краевой задачи для выделения в магнитной системе трубки магнитного потока, который реализован в *программе расчета проводимостей воздушных путей магнитного потока для плоских полей.*

Предположим, требуется определить магнитную проводимость между двумя торцевыми эквипотенциальными поверхностями *1*, *2* (рис. 36.1) вдоль трубки магнитного потока, ограниченной поверхностями *3*, *4*. Для плоскопараллельных полей принимаем размеры трубки в ортогональном к векторам поля направлении равными единице длины. Расчет сводится к решению внутренней краевой задачи для скалярного магнитного потенциала со смешанными граничными условиями: на участках *1* и *2* задаются фиксированные потенциалы φ_1 и φ_2, а на границах трубки *3* и *4* по определению силовые линии поля имеют только касательные компоненты, а нормальные отсутствуют, т.е.

$$\partial\varphi_3/\partial\mathbf{n} = 0, \qquad \partial\varphi_4/\partial\mathbf{n} = 0,$$

где $\mathbf{n}$ — вектор единичной нормали к поверхности.

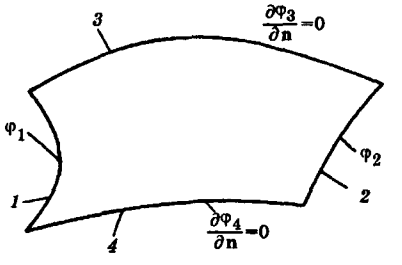


Рис. 36.1. Трубка магнитного потока

Численный метод решения базируется на ГИУ. На всех границах помещается простой слой фиктивных магнитных зарядов с неизвестной плотностью $\sigma_м$. Для параметров поля внутри трубки будут справедливы следующие интегральные выражения:

для магнитного потенциала

$$\varphi = \frac{1}{2\pi\mu_0}\oint_L \sigma_м \ln\frac{1}{r}\,dl;$$

для вектора напряженности магнитного поля

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi = -\frac{1}{2\pi\mu_0}\oint_L \frac{\sigma_м \mathbf{r}}{r^2}\,dl,$$

где интегрирование осуществляется по замкнутому контору L, образованному линиями *1*, *2*, *3*, *4* (см. рис. 36.1); $\mathbf{r}$ — радиус-вектор — расстояние между точками наблюдения и интегрирования.

Для нахождения магнитных зарядов $\sigma_м$ формируются уравнения исходя из требования выполнения заданных граничных условий. Точка наблюдения устремляется к границе изнутри области. На участках *1*, *2* записываем уравнения для заданных потенциалов:

$$\varphi_Q = \frac{1}{2\pi\mu_0}\oint_L \sigma_м \ln\frac{1}{r}\,dl = \begin{cases}\varphi_1, & Q \in l_1;\\ \varphi_2, & Q \in l_2,\end{cases}$$

а на участках *3*, *4* — для нормальной производной потенциалов

$$\frac{\partial\varphi_Q}{\partial\mathbf{n}} = -\frac{\sigma_м}{2\mu_0} + \frac{1}{2\pi\mu_0}\oint_L \frac{\sigma_м(\mathbf{n}\,\mathbf{r})}{r^2}\,dl = 0, \quad Q \in l_3 l_4,$$

где $\mathbf{n}$ — внутренняя нормаль в точке наблюдения.

Дополнительное слагаемое уравнений для производной потенциала получено после выделения особенности, содержащейся в уравнении несобственного интеграла. Таким образом, расчет $\sigma_м$ сводится к решению системы граничных интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода.

По плотности зарядов $\sigma_м$ вычисляется магнитный поток Φ в любом сечении трубки. Согласно условиям задачи он везде одинаков (на единицу длины в ортогоиальном направлении):

$$\Phi = \int_{l_1} \mathbf{B}\,dl = -\mu_0 \int_{l_1} \frac{\partial\varphi_1}{\partial\mathbf{n}}\,dl,$$

где l_1 — длина первого участка границы; $\partial\varphi_1/\partial\mathbf{n}$ — нормальная компонента напряженности поля на первой границе.

Искомая магнитная проводимость трубки рассчитывается по формуле

$$\lambda = \Phi/(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Наиболее трудоемкий этап метода заключается в численном решении уравнений. В приведенной программе (рис. 36.2) интегральные уравнения сведены к системе алгебраических уравнений с помо-

щью кусочно-постояиной аппроксимации плотности зарядов $\sigma_м$ по элементарным отрезкам границы L. При этом интегральные операторы заменяются конечными суммами. Точка наблюдеиий последовательно помещается в середину каждого элементарного отрезка и записывается соответствующее граничным условиям уравнение. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\frac{1}{2\pi\mu_0}\sum_{k=1}^{N}\sigma_{мk}\int_{\Delta l_k}\ln\frac{1}{r}\,dl=\varphi_i,$$

если точка наблюдеиия иа границе *1*, *2* ($i=1, 2$);

$$-\pi\sigma_{мi}+\sum_{k=1}^{N}\sigma_{мk}\int_{\Delta l_k}\frac{n_i r}{r^2}\,dl=0,$$

если точка наблюдения на граиице *3*, *4* ($i=3, 4$), где $k=1, 2, ..., N$ — иомер элементарного отрезка; $i=1, 2, ..., N$ — номер уравнеиия (номер элементариого отрезка, на котором располагается точка наблюдения).

Интегралы в последиих формулах имеют простые аналитические выражения, приведенные в [36.6].

Программа расчета проводимостей (см. рис.36.2) предусматривает задаиие контура в виде набора отрезков прямых лииий, составляющих последовательно замкнутый коитур при обходе по часовой стрелке. Каждый отрезок делится на заданное число элементарных отрезков с равным шагом. Исходиые даиные для расчета (см. комментарии к программе) включают в себя общее число отрезков прямых линий, декартовы координаты концов отрезков, число элементов деления каждого отрезка и указатель принадлежности отрезка к торцевым или боковым

```
      $DEBUG
      C   PROGRAMM***MRES***
      C   ПРОГРАММА РАСЧЕТА
      C   ПРОВОДИМОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПУТЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА
      C   ДЛЯ ПЛОСКИХ ПОЛЕЙ
      C   NG — Общее число отрезков, аппроксимирующих трубку потока
      C   CP(2, 2*NG) — Координаты вершин отрезков; обход контура по часо-
      C   вой стрелке
      C   NP(NG) — Число элементов разбиения каждого отрезка
      C    0 — боковые границы трубки,
      C   NGR(NG) — указатель принадлежности отрезка, 1 — первая торцевая
      C   граница трубки (потенциал равеи 1)
      C   -1 — вторая торцевая граница трубки (потенциал равен —1)
      C   SIG ( ) — плотность заряда
      C
          DIMENSION FM(100, 100)
          COMMON/GRUP1/NG
          COMMON/GRUP2/NP(20), CP(2, 40), NGR(20), FF(100, 100)
          COMMON/CRUP3/SIG(100)
          open(1, file='d.dat',status='old')
          READ(1,*)NG
          WRITE(*,10)NG
          NK = 0
          WRITE(*,11)
          DO 51 I = 1,NG
          WRITE(*,12) I
          K = 2* I — 1
          K1 = K + 1
          READ(1,*)CP(1,K),CP(2,K),CP(1,K1),CP(2,K1),NP(I),NGR(I)
          WRITE(*,16)CP(1,K),CP(2,K),CP(1,K1),CP(2,K1)NP(I),NGR(I)
          N = NP(I)
          DO 51 J = 1,N
      51  NK = NK + 1
          WRITE(*,13)
      C   Расчет коэффициеитов матриц
          write(*,*)nk
          CALL DMATR(FM,NK)
      C   Решение СЛАУ
          CALL PPAC(FM,NK)
          FD = 0.
          II = 0
          DO 52 I = 1,NG
```

Рис. 36.2 (начало)

```
      N = NP(I)
      KK1 = KK + 1
      KK = KK + N
      WRITE(*,14) I,(SIG(K),K = KK1,KK)
C     Расчет магнитного потока — FD
      DO 52 J = 1,N
      II = II + 1
      IF(NGR(I).LE.0)GOTO 52
      JJ = 0
      DO 53 I1 = 1,NG
      N1 = NP(I1)
      DO 53 J1 = 1,N1
      JJ = JJ + 1
53    FD = FD + FF(II,JJ)*SIG(JJ)
52    CONTINUE
      G = 12,56*1e-7*FD*0.5
      WRITE(*,15)G
10    FORMAT(3X,'ЧИСЛО ОТРЕЗКОВ NG = ',I3)
11    FORMAT(3X,'КООРДИНАТЫ ВЕРШИН ОТРЕЗ-
      КОВ',/,12X,'X1',9X,'Y1',9X,'X2',9X,'Y2',9X,'NP',9X,'NGR')
12    FORMAT(1X,'ОТРЕЗОК',I2)
13    FORMAT(3X,'ПЛОТНОСТЬ МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ')
14    FORMAT(3X,I3,(5E11.4))
15    FORMAT(3X,'МАГНИТНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ G = ',E11.4,'Вб/А')
16    FORMAT(4X,4(2X,e10.5),2(6X,I3))
      END
      SUBROUTINE DMATR(FM,NK)
      DIMENSION A2(2,4),A3(2,4),QX(2),FM(NK,NK),
     *T1(51),T2(51),T3(51),UP(50),U1(50),PAA(2)
      COMMON/GRUP1/NG
      COMMON/GRUP2/NP(20),CP(2,40),NGR(20),FF(100,100)
      PI = 3.14159265
      PI2 = 1/(8*1.E—7*PI**2)
      DO 98 I = 1,NK
      DO 98 J = 1,NK
      FF(I,J) = 0.
98    FM(I,J) = 0.
      II = 0
      DO 32 I = 1,NG
      N1 = NP(I)
      DO 33 J1 = 1,N1
      II = II + 1
      DO 101 L = 1,2
      L1 = 2*I
      C1 = CP(L,L1 — 1)
      C2 = CP(L,L1)
      PAA(L) = C2—C1
      XK = (J1—0.5)/N1
101   QX(L) = C1 + (C2—C1)*XK
      C3 = SQRT(PAA(1)**2 + PAA(2)**2)
      DL = C3/N1
      PAA(1) = PAA(1)/C3
      PAA(2) = PAA(2)/C3
      X = QX(1)
      Y = QX(2)
      KJJ = 0
      JJ = 0
      DO 20 I2 = 1,NG
      IF(I2.GT.1)KJJ = KJJ + N2
      N2 = NP(I2)
      DO 217 L = 1,2
      DO 217 K4 = 1,2
217   A3(L,K4) = CP(L,2*(I2—1) + K4)
```

Рис. 36.2 (продолжение)

```
      F4 = A3(1,2) - A3(1,1)
      F5 = A3(2,2) - A3(2,1)
      R = SQRT(F4*F4 + F5*F5)
      IF(R.LT.1.E—8)GO TO 20
      PA1 = F4/R
      PA2 = F5/R
      DO 209 K4 = 1,2
      A2(1,K4) = PA1*A3(1,K4) + PA2*A3(2,K4)
  209 A2(2,K4) = -PA2*A3(1,K4) + PA1*A3(2,K4)
      N3 = N2 + 1
      R5 = A2(2,1)
      R4 = A2(1,1)
      R2 = (A2(1,2) - R4)/N2
      DO 801 NL = 1,N3
      UP(NL) = 0.
  801 U1(NL) = 0.
      X2 = X*PA1 + Y*PA2
      Y2 = Y*PA1 - X*PA2
      DO 813 NL = 1,N3
      T1(NL) = 0.
      T2(NL) = 0.
  813 T3(NL) = 0.
      UY = R5—Y2
      IF(ABS(UY).LT.0.00001)UY = 0.00001
      DO 605 NL = 1,N3
      UX = R4 + R2*(NL—1)—X2
      UZ = UX*UX + UY*UY
      HP = 0.
      IF(NGR(I).EQ.0)GO TO 340
      HP = -(2*UX - 2*UY*ATAN(UX/UY) - UX*ALOG(UZ))*0.5
  340 HX = ALOG(UZ)*0.5
      HY = ATAN(UX/UY)
      T1(NL) = T1(NL) + HX
      T2(NL) = T2(NL) + HY
      T3(NL) = T3(NL) + HP
  605 CONTINUE
      DO 701 NL = 1,N2
      KN = NL + 1
  619 B4 = T1(KN) - T1(NL)
      B5 = T2(KN) - T2(NL)
      B3 = T3(KN) - T3(NL)
      B7 = B4*PA1 - B5*PA2
      B8 = B4*PA2 + B5*PA1
      B9 = (B7*PAA(2) - B8*PAA(1))*PI2
      IF(NGR(I).NE.0)GOTO 623
      UP(NL) = UP(NL) - B9
      GO TO 701
  623 UP(NL) = UP(NL) + B3*PI2
      U1(NL) = U1(NL) - B9
  701 CONTINUE
      DO 650 NL = 1,N2
      JJ = KJJ + NL
      FM(II,JJ) = FM(II,JJ) + UP(NL)
      IF(NGR(I).LE.0)GOTO 650
  655 FF(II,JJ) = FF(II,JJ) + U1(NL)*DL
  650 CONTINUE
      DO 850 NL = 1,N2
      UP(NL) = 0.
  850  U1(NL) = 0.
   20 CONTINUE
   33 CONTINUE
   32 CONTINUE
```

Рис. 36.2 (продолжение)

```
      RETURN
      END
      SUBROUTINE PPAC(FM,NK)
      DIMENSION FM(NK,NK),A(100)
      COMMON/GRUP1/NG
      COMMON/GRUP2/NP(20),CP(2,40),NGR(20),FF(100,100)
      COMMON/GRUP3/SIG(100)
      II = 0
      DO 1 I = 1,NG
      K = NP(I)
      DO 1 J = 1,K
      II = II + 1
      A(II) = NGR(I)
    1 CONTINUE
      DO 7 K = 1,NK
      IK = K + 1
      A(K) = A(K)/FM(K,K)
      IF(K.EQ.NK)GO TO 12
      DO 8 J = IK,NK
      FM(K,J) = FM(K,J)/FM(K,K)
    8 CONTINUE
   12 CONTINUE
      DO 7 I = 1,NK
      IF(I.EQ.K)GO TO 7
      A(I) = A(I) - FM(I,K)*A(K)
      IF(K.EQ.NK)GO TO 7
      DO 13 J = IK,NK
      FM(I,J) = FM(I,J) - FM(I,K)*FM(K,J)
   13 CONTINUE
    7 CONTINUE
      DO 21 I = 1,NK
   21 SIG(I) = A(I)
      RETURN
```

Рис. 36.2. Программа расчета проводимостей воздушных путей магнитного потока (окончание)

границам трубки. Потенциал первой границы задается равным —1, второй +1, т.е. $\varphi_2 - \varphi_1 = 2$.

Программа написана на языке ФОРТРАН-77 и имеет следующие (непринципиальные) ограничения в приведеиной реализации: максимальное число отрезков прямых — 20; элементарных отрезков — 100. В ней выделеио три структуриых элемента: головная программа, подпрограмма расчета коэффициентов матриц DMATR и подпрограмма решения системы линейных алгебраических уравнеиий PPAC.

36.3. МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Магнитные удерживающие механизмы иашли широкое применение во многих промышлеиных технологических устаиовках для захвата грузоподъемными устройствами, фиксации на обрабатывающих станках, транспортировки изделий из ферромагнитных материалов [36.7]. Для этих целей используются электромагниты постоянного или переменного тока, а также различные конструкции с постоянными магнитами с шунтированием магнитного потока или управлеиием импульсиыми токовыми катушками.

Электромагниты грузоподъемных устройств (рис. 36.3) состоят из корпуса *1*, выполняющего фуикции магнитопровода и изготовленного из стали с высокой магиитиой проницаемостью и высокой механической прочностью, катушки электромагнита *2*, которая крепится герметично в корпусе при помощи немагнитной шайбы *3*. Конструктивно электромагниты выпускают круглыми, вытянуты-

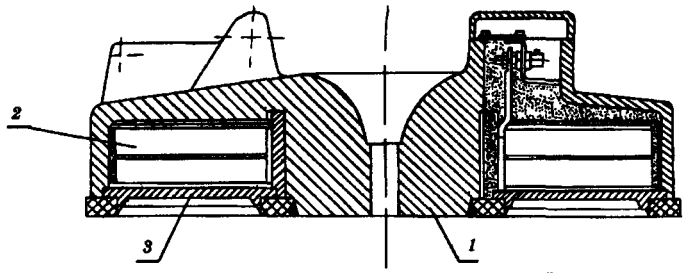


Рис. 36.3. Электромагиит грузоподъемного устройства

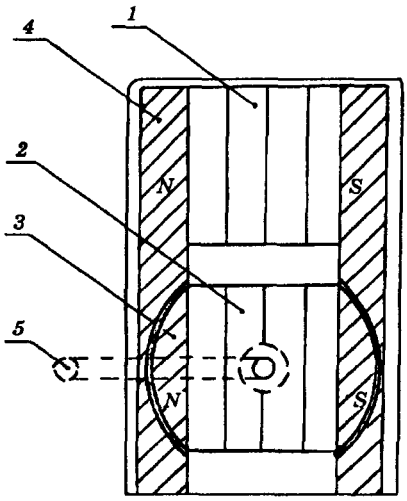


Рис. 36.4. Удерживающее устройство с магнитным шунтированием

ми, прямоугольными, многополюсными в зависимости от целевого назначения. Для улучшения магнитного контакта с неровными поверхностями и увеличения силы притяжения полюса электромагнита снабжаются "плавающими" ферромагнитными башмаками. Исходными для расчета являются сила притяжения (грузоподъемность устройства), воздушный эквивалентный зазор между полюсами электромагнита и притягиваемой деталью, магнитные свойства детали. Так как в рабочем состоянии электромагнита потоки рассеяния невелики, то расчеты с достаточной точностью производятся с использованием эквивалентных схем магнитной цепи.

Удерживающее устройство на постоянных магнитах с использованием магнитного шунтирования для расцепления с грузом показано на рис. 36.4. Оно состоит из неподвижного магнита *1*, подвижного магнита *2* с магнитомягкими полюсами сегментной формы *3*, магнитомягких полюсов *4* с сегментными проточками и рычага *5*, которым производится поворот магнита *2*. На рисунке изображено рабочее положение магнита *2*. При повороте на 180° магнит *2* шунтирует поток магнита *1* и груз к полюсам не притягивается.

На рис. 36.5 изображено *удерживающее устройство на постоянных магнитах, у которого для управления притягиванием и отпусканием используется перемагничивание магнита импульсом тока в катушке*. Устройство имеет два кольцевых посто-

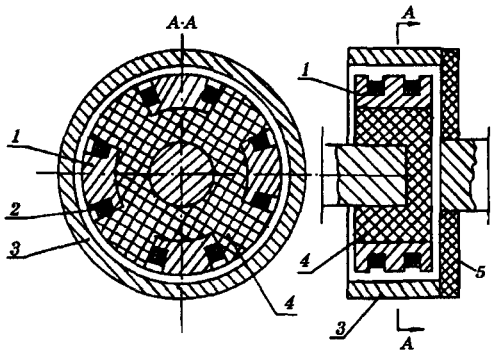


Рис. 36.6. Радиальная электромагнитная опора

янных магнита *4*, *9*, которые крепятся между двумя полюсными наконечниками *3*, *10* из магнитомягкой стали с помощью немагнитных винтов *5*. На каждый постоянный магнит надеты на каркасе катушки перемагничивания *2*, *6*. Защита катушек от повреждений осуществляется немагнитными листами *1*, *7*, *8*. Для захвата устройство опускается на груз, затем через катушки *2* пропускается импульс тока так, чтобы намагнитить до насыщения постоянные магниты *4* и *9*. Магнитные потоки магнитов замкнутся через груз, и он притянется. Для отпускания груза магнитный поток гасится путем перемагничивания одного из магнитов импульсом тока обратного направления.

Магнитные опоры и подшипники. На рис. 36.6 изображена радиальная электромагнитная опора, где в качестве активных элементов выступают четыре электромагнита с Ш-образными сердечниками *1* и катушками *2*, расположенными симметрично по окружности в немагнитной оправке *4*. Жестко закрепленная оправка с электромагнитами помещена в стакан *3* из магнитомягкого материала, который с помощью немагнитного диска *5* скреплен с подвижной частью опоры. Принцип действия заключается в следующем. При появлении сигнала с датчика положения подается ток в катушку электромагнитов и возникает сила магнитного притяжения к стакану со стороны, противоположной направлению перемещения. Стакан со скрепленным с ним удерживаемым устройством возвращается в центральное положение.

Существенным преимуществом электромагнитных опор представляется возможность регулировать жесткость (производную силы по перемещению) изменением силы тока, а также возможность независимого построения радиальных и осевых опор.

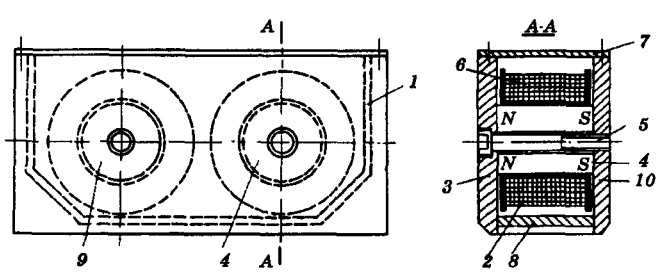


Рис. 36.5. Удерживающее устройство на постоянных магнитах, управляемое с помощью перемагничивания

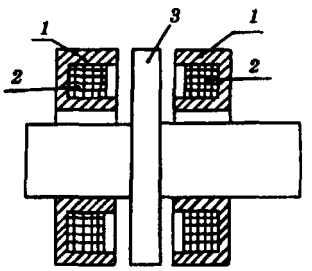


Рис. 36.7. Осевая электромагнитная опора

Последнее вызывает большие трудности при использовании постоянных магнитов в магнитостатических опорах.

Осевая электромагнитная опора (рис. 36.7) состоит из двух кольцевых магнитопроводов *1*, в пазах которых помещены катушки *2*. На валу устройства жестко закреплен диск *3* из магнитомягкого материала, расположенный в центре зазора между симметричными секциями электромагнита. При смещении вала вдоль оси в катушку, от которой удаляется диск *3*, подается ток. Возникающий магнитный поток замыкается по магнитопроводу и диску, и появляется сила, действующая в противоположную сторону от смещения. Вал возвращается в исходное положение. Питание обмоток электромагнита осуществляется от источника, управляемого сигналами датчиков положения.

Радиальные магнитостатические подшипники. Существует большое многообразие предложений по построению магнитных опор и подшипников на постоянных магнитах. На рис. 36.8 приведена конструкция радиального магнитостатического подшипника, состоящая из намагниченных по радиусу кольцевых магнитов *1*, *2*, *3* из высококоэрцитивного материала, армированных тонкими кольцевыми концентраторами *4–9* магнитного потока из магнитомягкого материала. Центральная секция закреплена на валу *10* удерживаемого устройства, а боковые секции крепятся к корпусу и неподвижны. Магнитные потоки, созданные постоянными магнитами, замыкаются в малых зазорах между боковыми поверхностями концентраторов. В симметричном положении результирующая сила на центральную секцию равна нулю. При радиальном смещении в зазорах возникают радиальные составляющие индукции, которые вызывают не скомпенсированную радиальную силу притяжения, возвращающую подшипник в симметричное исходное положение. Такая конструкция обладает высокой жесткостью к радиальным смещениям, однако неустойчива к осевым смещениям, так как малые осевые смещения приводят к образованию осевых сил, действующих в направлении смещения.

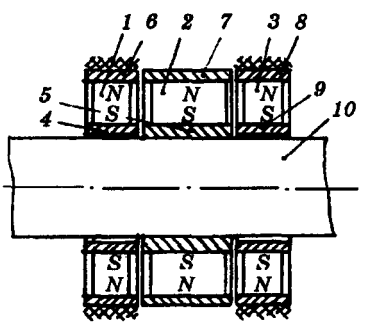


Рис. 36.8. Радиальный магнитостатический подшипник

Синхронные магнитные и электрические механизмы предназначены для передачи механической энергии бесконтактным способом посредством сил магнитного взаимодействия, возникающих при прохождении магнитного потока через ферромагнитные элементы механизма [36.3]. Практически все механические схемы механизмов могут быть выполнены бесконтактно с использованием сил магнитного притяжения. На рис. 36.9 изображена *радиальная магнитная муфта*, у которой магнитный поток создается кольцевым постоянным магнитом *1*, армированным зубчатыми дисками из магнитомягкого материала. Магнит закреплен на валу *5*. На валу *6* крепится магнитомягкий стакан *4* с зубчатой насечкой на внутренней поверхности с шагом, соответствующим шагу зубцов на дисках. Между зубчатыми поверхностями существует воздушный зазор, достаточный для установки герметизирующих кожухов, экранов и т. п. Передача механической энергии вращения осуществляется за счет сил притяжения между зубцами диска и стакана, возникающих при их угловом смещении одного относительно другого. В магнитной муфте вместо магнита может быть использована катушка с током. Источник магнитного поля (постоянный магнит, катушка) в различных конструкциях располагают как на ведущем, так и на ведомом валу, а также в неподвижном состоянии вне муфты.

Примеры исполнения редукторных магнитных механизмов цилиндрического и червячного типов приведены на рис. 36.10 и 36.11. От соответствующих механических устройств они отличаются воздушным зазором между ведущим и ведомыми узлами и наличием постоянного магнитного поля.

Фокусирующие магнитные системы. Система с постоянными магнитами ступенчатого вида для фокусировки электронных пучков показана на рис. 36.12. Она состоит из протяженного рабочего зазора *1*, в который помещается прибор, окруженный ступен-

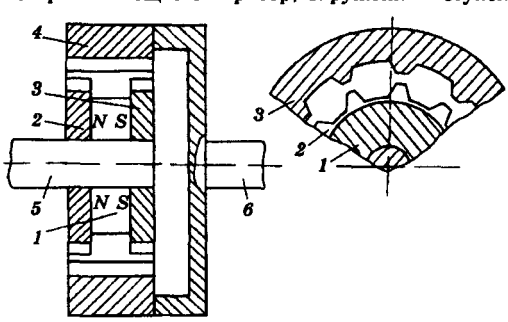


Рис. 36.9. Радиальная магнитная муфта

1 — кольцевой постоянный магнит; *2* — зубчатые диски из магнитомягкого материала; *4* — внешний зубчатый стакан из магнитомягкого материала; *5* — ведущий вал; *6* — ведомый вал

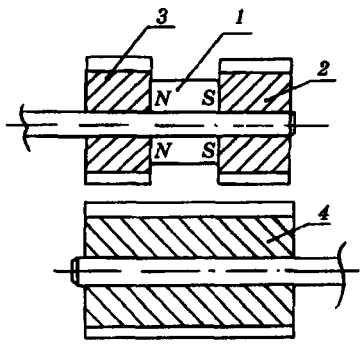


Рис. 36.10. Редукторный зубчатый магнитный механизм
1 — цилиндрический постоянный магнит; *2, 3* — ведущие зубчатые диски; *4* — ведомый зубчатый диск

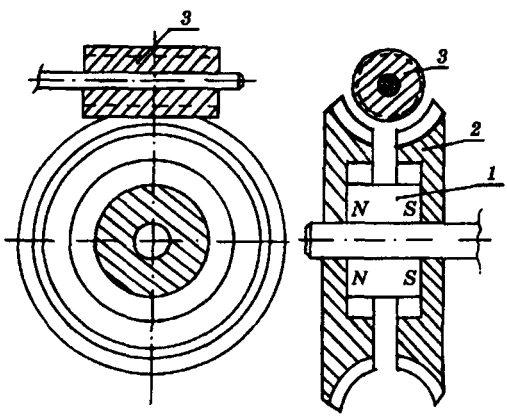


Рис. 36.11. Редукторный червячный магнитный механизм
1 — постоянный магнит; *2* — зубчатые диски из магнитомягкого материала; *3* — червяк из магнитомягкого материала

чатыми магнитами *2* из высококоэрцитивного сплава. Левая и правая части магнита намагничены в противоположные стороны в ортогональном к оси зазора направлении. Магниты с внешней стороны армированы пластинами магнитопроводов *3* из маг-

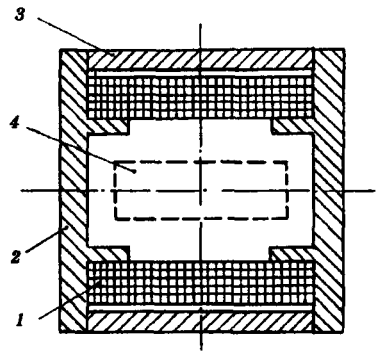


Рис. 36.13. Электромагнитная фокусирующая система с протяженной рабочей зоной
1 — катушка электромагнита; *2* — торцевые полюса; *3* — магнитопровод; *4* — рабочая зона

нитомягкого материала. Ступенчатый внутренний профиль магнитов и их высота рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить заданные уровень и однородность поля. С помощью электромагнита подобная задача решается использованием солеиоида, армированного магнитопроводом и внутренними полюсами на торцах (рис. 36.13). При создании однородных полей часто используют скобообразные наконечники из магнитомягкого материала, как показано на рис. 36.14 и 36.15. Это позволяет достичь необходимого эффекта без профилирования магнитов, что оказывается более технологичным.

Недостаток однонаправленных систем с постоянными магнитами в малом абсолютном уровне напряженности поля, который ограничивается большой длиной зазора. Принимая во внимание, что фокусирующий эффект сохраняется при изменении направления вектора напряженности поля на противоположное, значение напряженности поля удается повысить за счет использования *реверсных и периодических систем*.

На рис. 36.16 изображена магнитная периодическая фокусирующая система. Она состоит из ряда чередующихся полярностью кольцевых постоянных магнитов с осевой

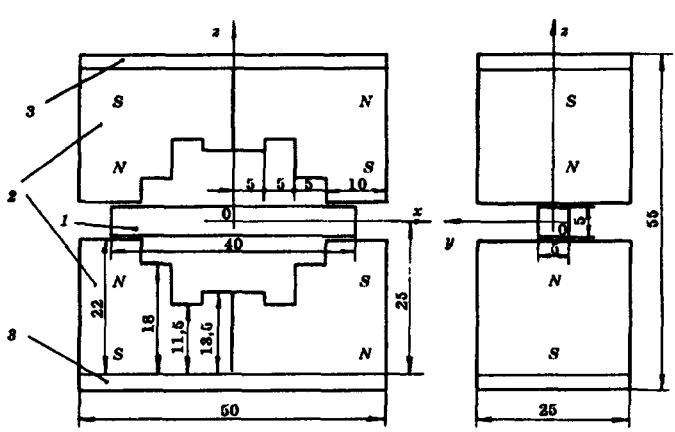


Рис. 36.12. Фокусирующая система ступенчатого типа
1 — рабочая зона; *2* — постоянные магниты; *3* — магнитопроводы

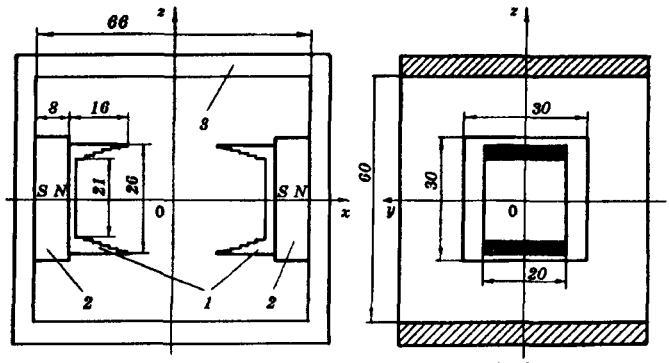


Рис. 36.14. Фокусирующая система с постоянными магнитами со скобообразными наконечниками

1 — наконечники; 2 — постоянные магниты; 3 — магнитопровод

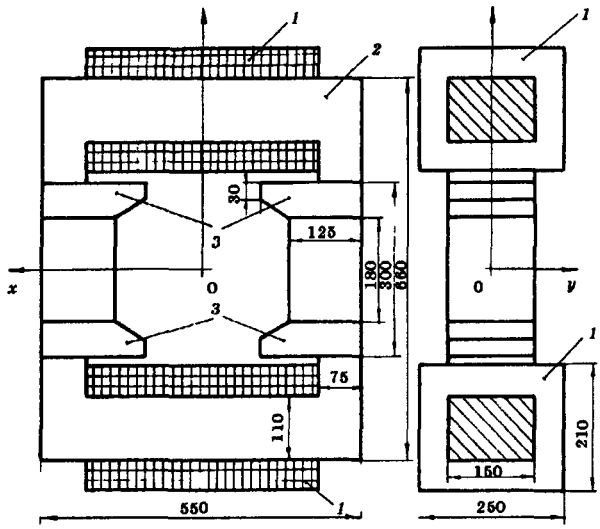


Рис. 36.15. Электромагнит с подвижными полюсами

1 — катушки электромагнита; 2 — магнитопровод; 3 — подвижные полюса

намагниченностью. Между магнитами вставляются магнитомягкие кольцевые полюса. Регулируя соотношение размеров полюсов, добиваются необходимого закона распределения поля на оси.

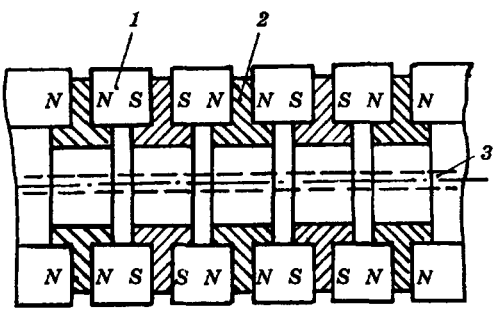


Рис. 36.16. Магнитная периодическая фокусирующая система

1 — постоянный магнит; 2 — полюсный наконечник; 3 — рабочая зона

36.4. ИСТОЧНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При испытании магнитных материалов требования к источнику магнитного поля сводятся к получению необходимого значения максимальной напряженности поля при минимальном потреблении электроэнергии и определенной однородности его в рабочем зазоре. Используются для этих целей, как правило, соленоиды и электромагниты [36.8—36.15].

Для однослойного (тонкостенного) соленоида (рис. 36.17, *а*) напряженность магнитного поля H_z вдоль его оси определяется выражением [36.8]

$$H_z = \frac{w I}{4b}\left(\cos Q_2 - \cos Q_1\right),$$

где w и I — число витков и ток соленоида;

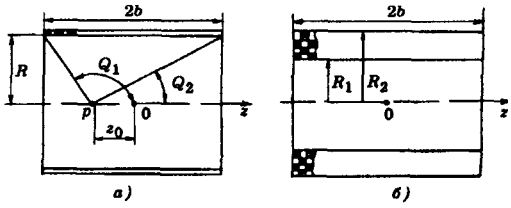


Рис. 36.17. К расчету напряженности магнитного поля однослойного (*а*) и многослойного (*б*) соленоидов

$$\cos Q_1 = -\frac{b-z_0}{\sqrt{R^2+(b-z_0)^2}};$$

$$\cos Q_2 = \frac{b+z_0}{\sqrt{R^2+(b+z_0)^2}}.$$

При $b>>R$ соленоид условио можно считать бесконечно длинным и выражение для иапряженности поля H_0 в центре его примет вид

$$H_0 = wI/2b.$$

Для обеспечения больших значений H (до 400 кА/м) используют многослойные соленоиды (рис. 36.17, *б*).

Соотношение для напряженности поля вдоль оси в общем случае имеет вид

$$H_z = H_0\left[\frac{F(\alpha, \beta+z_0/R_1)+F(\alpha, \beta-z_0/R_1)}{2F(\alpha, \beta)}\right],$$

где

$$\alpha = R_2/R_1;\ \beta = b/R_1;$$

$$F(\alpha, \beta) = \beta \ln \frac{\alpha+\sqrt{\alpha^2+\beta^2}}{1+\sqrt{1+\beta^2}}.$$

Для выравнивания напряженности поля вдоль оси соленоидов применяют конструкции, состоящие из двух катушек с зазором между ними (рис. 36.18).

Выражение, характеризующее распределение напряженности магнитного поля вдоль оси таких соленоидов, имеет вид

$$H_z = \frac{J\lambda R_1}{2}\left[F\left(\alpha,\ 2\beta+\frac{b_0}{2R_1}+\frac{z_0}{R_1}\right)-\right.$$

$$-F\left(\alpha, \frac{b_0}{2R_1}+\frac{z_0}{R_1}\right)+F\left(\alpha,\ 2\beta+\frac{b_0}{2R_1}-\frac{z_0}{R_1}\right)-$$

$$\left.-F\left(\alpha, \frac{b_0}{2R_1}-\frac{z_0}{R_1}\right)\right],$$

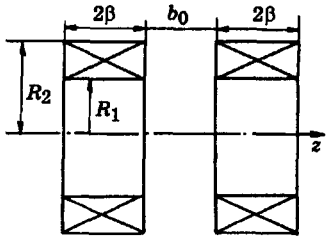


Рис. 36.18. Двухкатушечные соленоиды для выравнивания напряженности магнитного поля

где J — плотность тока; $\lambda = S_1/(S_1+S_0)$ — отношеиие площади, занятой проводиикоы, ко всей площади осевого сечеиия соленоида.

Получение снльных магнитных полей малой длительности обеспечивается импульсными соленоидами [36.11, 36.12]. Принцип работы их заключается в том, что энергия, запасенная в определенной форме, высвобождается в короткий промежуток времени в виде электрического тока через соленоид. В настоящее время наиболее распространенными системами храиения энергии являются конденсаторные батареи. Эквивалентная схема системы "конденсаторная батарея — импульсный солеиоид" представлена на рис. 36.19. Конденсатор C заряжается от источника питания до напряжения U_0, в нем запасается энергия $W = CU_0^2/2$. При замыкании ключа S конденсатор разряжается через цепь, состоящую из сопротивления R и индуктивности L соленоида. Ток разряда i определяется уравнением

$$LC\frac{d^2i}{dt^2} + RC\frac{di}{dt} + i = 0.$$

Здесь возможны два режима установлеиия переходного процесса разряда конденсатора: критический ($R^2 = 4L/C$) или апериодический ($4L/C<R^2$); колебательный ($4L/C>R^2$).

Полупериод колебаний при разряде определяется выражением

$$T/2 = \pi/\omega = \pi\sqrt{LC/(1-d)},$$

а с учетом того, что $d = R^2C/4L$ и $\sqrt{LC} = 2L\sqrt{d}/R$,

$$T/2 = 2\pi L\sqrt{d/(1-d)},$$

где d — коэффициент затухания переходного процесса.

Для получения большей длительности импульсов катушки должны изготовляться из материала большей проводимости. По конструкции импульсные соленоиды отличаются от работающих в стационарием режиме тем, что они охлаждаются за счет наружного теплоотвода. При создании полей до 10 мА/м обмотки изготавливаются из обычной медной проволоки, заливаются эпоксидной смолой и помещаются в латуиный илн стальной кожух.

Очевидиым решеиием задачи обеспечения требуемого магнитного поля при меньших затратах мощ-

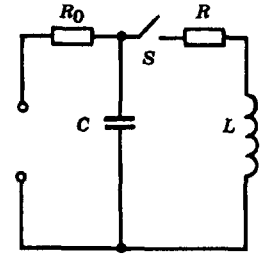


Рис. 36.19. Схема замещения импульсного источника магнитного поля

Таблица 36.1. Данные некоторых

Электромагнит	Форма ярма	Диаметр полюсного наконечника, мм	Длина рабочего зазора, мм	Сопротивление обмоток, Ом
МГУ ФЛ-1	П-образная	25—100	0—100	16
АН СССР	Кубическая	20—58	10—80	4
НИИЧМ	Цилиндрическая	22—100	6—60	1,68
МЭИ ЭМ-1	Цилиндрическая	30—50	3—20	8
МЭИ ЭМ-2	Цилиндрическая	30	5—30	8,5
МЭИ ЭМ-3	Цилиндрическая	20	5—30	3
Установки У5056	О-образная	—	4—100	—
ЦНИИИА	Кубическая	60	15—30	4

ности является создание источника поля с применением ферромагнитного материала — электромагнита (ЭМ). Однако здесь следует учитывать тот факт, что магнитная индукция насыщения ферромагнетиков ограничена (около 2,5 Тл). Тем не менее, с использованием ферромагнитных материалов можно получить магнитные поля напряженностью примерно до 5000 кА/м, оптимизируя конструкцию магнитной цепи и используя концентрацию магнитного потока в межполюсном зазоре. Так, в настоящее время уже существуют электромагниты, позволяющие получать поля напряженностью 3500—4000 кА/м, достаточные для намагничивания до насыщения большинства существующих магнитотвердых материалов. В качестве исходного материала ярма в них широко используются низкоуглеродистые электротехнические стали.

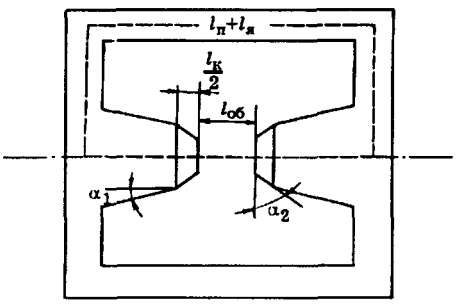


Рис. 36.20. Магнитная цепь электромагнита для испытания магнитотвердых материалов

Магнитную цепь ЭМ для испытания магнитных материалов можно представить в виде трех участков (рис. 36.20): рабочего зазора, длина и сечение ко-

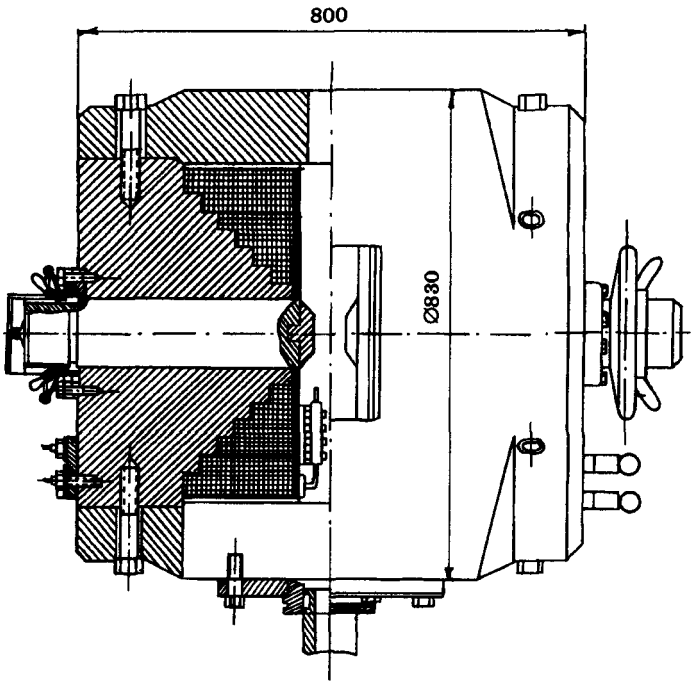


Рис. 36.21. Конструкция электромагнита ЦНИИЧМ

отечественных электромагнитов

Потребляемая мощность, В·А	Охлаждение	Габариты, мм	Масса, кг	Напряженность поля, кА/м
3	Естественное	420×625×1160	900	2000 (в зазоре 12 мм)
6	Водяное	400×810×870	600	3000 (в зазоре 10 мм)
4,2	Естественное	830×830×800	3500	4000 (в зазоре 6 мм)
В импульсе 1,7	Естественное	248×248×444	65	2400 (в зазоре 4 мм)
В импульсе 5	Естественное	395×395×585	205	2800 (в зазоре 6 мм)
В импульсе 30	Водяное	515×850×800	650	4000 (в зазоре 6 мм)
1,5	Естественное	1000×1200×800	400	1500 (в зазоре 5 мм)
6	Естественное	700×750×500	1500	2400 (в зазоре 15 мм)

торого равны длине $l_{об}$ и сечению $S_{об}$ испытуемого образца; участка длиной $l_к$ и сечением $S_к$, где происходит концентрация магнитиого потока (полюсные наконечники); ярма и полюсов ЭМ длиной $l_2' = l_п + l_я$ и сечением $S_я$.

Анализ и экспериментальное исследование влияния конусности концентратов и полюсов иа эффект концентрации магнитного потока показали:

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля до 1200 кА/м магнитная система выбирается с участком $l_к = 0$, материал полюсов берется с большой индукцией насыщеиия, конусность полюсов делается иебольшой;

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля до 2400 кА/м $l_к > 0$, угол конусности α_2 коицентраторов находится в пределах 30—80°;

для электромагнитов с максимальной напряженностью поля свыше 2400 кА/м требуемые значения H достигаются кроме концентрации потока за счет увеличения магнитодвижущей силы путем увеличения числа витков намагничивающих катушек или увеличения плотности тока;

для обеспечения ненасыщенности полюсов и ярма, т.е. малого магнитного сопротивления, магнитное состояние материала должно соответствовать области кривой намагничивания с μ_{max}, угол конусности полюсов α_1 должен находиться в пределах 15—30°;

наиболее рациональной конструкцией ярма является конструкция панцирного типа, она создает осевую симметрию магнитного потока и позволяет свести к минимуму его рассеяние, служит хорошим экраном магнитного поля.

В табл. 36.1 приведены основные данные о параметрах и коиструкции некоторых электромагнитов отечественного производства, находящихся в эксплуатации. На рис. 36.21 в качестве примера приведено конструктивное исполнение одного из них.

36.5. ЭТАЛОННЫЕ ИСТОЧНИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Необходимость создания и измерения магнитных полей в широком диапазоне магнитных иидукций (от 10^{-12} до 50 Тл) выдвигает задачу разработки эталонных источников магнитного поля — мер магнитной индукции различных типов. Основными требованиями к эталонным источникам магнитного поля являются: обеспечение заданного значения магнитной ииндукции, стабильность ее, обеспечение высокой однородности поля в задаином объеме, минимальные погрешности воспроизведения.

В зависимости от значеиия магнитной индукции эталонные источники магнитного поля выполняются в виде прецизионных катушек (однослойных, многослойных, специальной формы), электромагнитов, соленондов.

Для создания эталонных источников магнитного поля до 2 мТл высокой однородности получили распространение системы типа Гельмгольца, Максвелла, Баркера и Гаррета (рис. 36.22). Рекомендации к расположению намагничивающих колец для получения высокооднородного поля приведены в табл. 36.2.

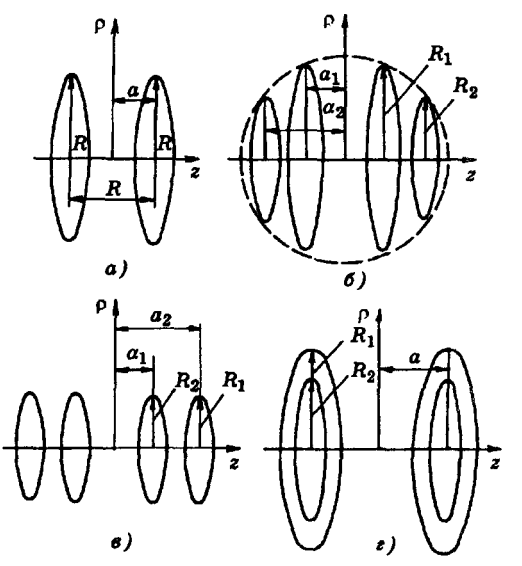
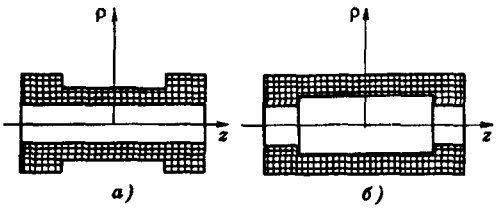


Рис. 36.22. Системы соосных кольцеобразных секций для создания слабых полей высокой однородности (ρ, z — цилиндрические системы координат)

Таблица 36.2. Геометрическое расположение колец различных систем

Система	Число колец	Размеры	Рисунок
Гельмгольца	2	$a/R = 1{,}2$	36.22, *а*
Максвелла	4	$R_2/R_1 = 0{,}6719$; $a_1/R_1 = 0{,}2976$; $a_2/R_2 = 1{,}1880$; $w_2/w_1 = 0{,}6821$	36.22, *б*
Баркера	4	$R_2/R_1 = 1$; $a_1/R_1 = 0{,}2432$; $a_2/R = 0{,}9407$; $w_2/w_1 = 2{,}2606$	36.22, *в*
Гаррета	4	$R_2/R_1 = 0{,}2652$; $a/R_1 = 0{,}4347$; $w_2/w_1 = 0{,}02453$	36.22, *г*

Примечание. w_1 и w_2 — число витков катушек.



а) *б)*

Рис. 36.23. Системы соленоидов для создания магнитных полей высокой однородности

а — катушка Жерара—Сезада; *б* — катушка Монтгомери

Для получения полей с магнитной индукцией до 30 мТл широко применяются тоикостенные соленоиды. Однородность поля обеспечивается увеличением длины обмотки соленоида, применением различного рода корректирующих катушек, разбиением обмотки на секции (солеиоиды Гельмгольца и Гаррета).

Для получения полей с магнитной индукцией более 0,03 Тл требуется увеличение толщины обмоток. Для обеспечения однородного магнитного поля используют при построеиии таких систем конструкции катушек Жерара—Сезада и Монтгомери (рис. 36.23, *а*, *б*).

Следует учитывать, что увеличение магнитной индукции сопровождается чрезмерным нагреванием обмоток и увеличением механических нагрузок на них, что приводит к необходимости принудительного охлаждеиия и механического упрочения обмоток.

В последние годы появились разработки источников сильного однородного магнитного поля, основаниых на использовании явления сверхпроводимости и работающих при температуре жидкого гелия. Примером может служить катушка Жерара—Сезада, помещенная в гелиевый криостат. В рабочем пространстве поддерживается комнатная температура, значение индукции составляет 5 Тл.

Подробное описание методик конструирования, технологии изготовления катушек, вопросов охлаждения, прочности приведено, иапример, в [36.12, 36.13].

Следует отметить широкое использование электромагнитов при построении эталонных источников сильных магнитных полей высокой однородности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

36.1. Бугаев Г.А. Расчет обмоток электромагнитных механизмов. М., 1970 (Отделение ВНИИЭМ по научно-технической информации в электротехнике).

36.2. Постоянные магниты: Справочник / А.Б. Альтман, А.Н. Герберг, П.А. Гладышев и др.; Под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980.

36.3. Гинзбург Л.В., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. Л.: Машиностроение, 1980.

36.4. Расчет электротехнических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ / М. Г. Александрова, А.Н. Белянин, В. Брюкнер и др.; Под ред. Л.В. Данилова и Е.С. Филиппова. М.: Радио и связь, 1983.

36.5. Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машиные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа, 1986.

36.6. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984.

36.7. Калинкин В.С., Фейлер Г.О. Подъемные электромагниты. М.: Металлургиздат, 1962.

36.8. Шихин А.Я. Автоматические магнитоизмерительные системы. М.: Энергия, 1977.

36.9. Испытания магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин; Под ред. А.Я. Шихина. М.: Энергоатомиздат, 1984.

36.10. Чечерников В.И. Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969.

36.11. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. М.: Наука, 1964.

36.12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные поля. М.: Мир, 1972.

36.13. Гречишкин Р.Н., Пастушенков Ю.Г., Супонев И.П. Метод создания магнитных полей. Калинин: КГУ, 1985.

Раздел 37

ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

СОДЕРЖАНИЕ

37.1. Виды преобразования электрической энергии 417
37.2. Силовые полупроводниковые ключи 419
Диоды (420). Биполярные транзисторы (420). Статические индукционные транзисторы (421). Мощные МДП-транзисторы (427). Биполярные транзисторы с изолированным затвором (432). Силовые интеллектуальные модули (434). Тиристоры (434). Тиристоры новых технологий (434). Драйверы силовых ключей (437).
37.3. Выпрямители с идеальными вентилями и трансформаторами 443
Общие сведения (443). Однофазная однополупериодная схема выпрямления (444). Схемы однофазных двухполупериодных выпрямителей (444). Схемы выпрямителей трехфазного тока (444).
37.4. Пульсации выпрямленного напряжения и тока. Сглаживающие фильтры . . . 446
37.5. Схемы выпрямителей трехфазного тока средней и большой мощности 448
Общие сведения (448). Работа выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку (449). Работа выпрямителей на противоЭДС (450).
37.6. Ведомые сетью (зависимые) инверторы 451
37.7. Коэффициент мощности преобразовательных установок 452
37.8. Выпрямители с нулевым вентилем и несимметричные мостовые схемы . . . 453
37.9. Реверсивные преобразователи с двумя вентильными комплектами 455
Схемы и режимы работы двухкомплектных реверсивных преобразователей (455). Уравнительный ток (457). Раздельное управление вентильными комплектами (457).
37.10. Преобразователи частоты с непосредственной связью 458
37.11. Системы управления тиристорными преобразователями 459
37.12. Регулируемые преобразователи переменного напряжения 461
37.13. Узлы принудительной коммутации тиристорных преобразователей 463
37.14. Автономные инверторы тока 465
37.15. Автономные инверторы напряжения. Импульсные преобразователи 469
37.16. Выходные фильтры автономных инверторов напряжения 474
37.17. Автоиомные резонансные инверторы 477
37.18. Источники вторичного электропитания. Основные определения 480
37.19. Импульсные регуляторы постоянного напряжения 480
Основные типы регуляторов (480). Характеристики регулятора I рода (481). Характеристики регулятора II рода (483). Регуляторы с гальваническим разделением входной и выходиой цепей (484). Регуляторы с кондеисаторным разделением входной и выходной цепей (484).
37.20. Однотактные преобразователи постояиого напряжеиия (ОПН) 485
Основные типы преобразователей напряжеиия (485). ОПН с передачей энергии в импульсе (486). ОПН с передачей энергии в паузе (487). ОПН с передачей энергии в импульсе и паузе (488). Однотактные преобразователи напряжения с магнитно-связанными дросселями (489).
37.21. Двухтактные преобразователи напряжения (ДПН) 490
Разновидности ДПН (490). Простейший автогенераторный ДПН (491). Автогенераторные ДПН с внутренней синхронизацией (491). Автогенераторные ДПН с магнитным накопителем иа первичной стороне трансформатора (492). ДПН с внешним управлением (494).
37.22. Системы управления импульсиыми регуляторами и преобразователями постоянного напряжения 495
Список литературы 496

37.1. ВИДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях и передается потребителям главным образом в виде переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц. Однако как в промышленности, так и на траиспорте имеются установки, для питания которых переменный ток частотой 50 Гц иепригоден.

Вопросами, связанными с преобразованием электрической энергии из одного ее вида в другой, занимается область иауки и техники, получившая название преобразовательной техники (или энергети-

ческой электроники). К числу основных видов преобразования электрической энергии относятся:

1. Выпрямление переменного тока — преобразование переменного тока (обычно промышленной частоты) в постоянный ток. Этот вид преобразования получил наибольшее развитие, так как часть потребителей электрической энергии может работать только на постоянном токе (электрохимические и электрометаллургические установки, линии передачи постоянного тока, электролизные ванны, заряжаемые аккумуляторные батареи, радиотехническая аппаратура и т.д.), другие же потребители имеют на постоянном токе лучшие характеристики, чем на переменном токе (регулируемые электродвигатели).

2. Инвертирование тока — преобразование постоянного тока в переменный. Инвертор применяется в тех случаях, когда источник энергии генерирует постоянный ток (электромашинные генераторы постоянного тока, аккумуляторные батареи и другие химические источники тока, солнечные батареи, магнитогидродинамические генераторы и т.д.), а для потребителей нужна энергия переменного тока. В ряде случаев инвертирование тока необходимо при других видах преобразования электрической энергии (преобразование частоты, преобразование числа фаз).

3. Преобразование частоты — преобразование переменного тока одной частоты (обычно 50 Гц) в переменный ток другой частоты. Такое преобразование необходимо для питания регулируемых электроприводов переменного тока, установок индукционного нагрева и плавки металлов, ультразвуковых устройств и т. д.

4. Преобразование числа фаз. В ряде случаев встречается необходимость в преобразовании трехфазного тока в однофазный (например, для питания дуговых электропечей) или, наоборот, однофазного в трехфазный. Так, на электрифицированном транспорте используется контактная сеть однофазного переменного тока, а на электровозах используются вспомогательные машины трехфазного тока. В промышленности используются трехфазно-однофазные преобразователи частоты с непосредственной связью, в которых наряду с преобразованием промышленной частоты в более низкую происходит и преобразование трехфазного напряжения в однофазное.

5. Преобразование постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения (преобразование постоянного напряжения). Подобное преобразование необходимо, например, на ряде подвижных объектов, где источником электроэнергии является аккумуляторная батарея или другой источник постоянного тока низкого напряжения, а для питания потребителей требуется более высокое постоянное напряжение (например, источники питания радиотехнической или электронной аппаратуры).

Существуют и некоторые другие виды преобразования электрической энергии (например, формирование определенной кривой переменного напряжения), в частности, формирование мощных импульсов тока, которые находят применение в специальных установках, регулируемое преобразование переменного напряжения. Все виды преобразований осуществляют с использованием силовых ключевых элементов. Основные типы полупроводниковых ключей — диоды, силовые биполярные транзисторы, тиристоры, запираемые тиристоры, транзисторы с полевым управлением.

Преобразователи на тиристорах принято делить на две группы: *ведомые* и *автономные*. В первых периодический переход тока с одного вентиля на другой (коммутация тока) осуществляется под действием переменного напряжения какого-либо внешнего источника. Если таким источником является сеть переменного тока, говорят о преобразователе, ведомом сетью. К таким преобразователям относятся: выпрямители, ведомые сетью (зависимые) инверторы, непосредственные преобразователи частоты, преобразователи числа фаз, преобразователи переменного напряжения. Если внешним источником напряжения, обеспечивающим коммутацию, является машина переменного тока (например, синхронный генератор или двигатель), преобразователь называют ведомым машиной.

Автономные преобразователи выполняют функции преобразования формы или регулирования напряжения (тока) путем изменения состояния управляемых силовых ключевых элементов под действием сигналов управления. К автономным преобразователям относятся импульсные регуляторы постоянного и переменного напряжения, некоторые виды инверторов напряжения.

Традиционно силовые вентильные преобразователи использовались для получения выпрямленного напряжения промышленных сетей частотой 50 Гц и для получения переменного напряжения (однофазного или трехфазного) при питании от источника постоянного напряжения. Для этих преобразователей (выпрямителей и инверторов) используют диоды и тиристоры, коммутируемые с частотой сети. Форма выходного напряжения и тока определяется линейной частью схемы и фазовой модуляцией угла регулирования.

Выпрямление и инвертирование продолжают оставаться ведущим способом преобразования электрической энергии, однако способы преобразования претерпели значительные изменения и их разновидности стали гораздо многочисленнее.

Появление новых типов силовых полупроводниковых вентилей, близких к идеальному управляемому ключевому элементу, существенно изменило подход к построению вентильных преобразователей. Получившие распространение в последние годы запираемые тиристоры (GTO — gate turn off thyristor) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ — IGBT — insolated gate bipolar transistor) успешно перекрывают диапазон мощностей до сотен и тысяч киловатт, их динамические свойства непрерывно совершенствуются, а стоимость с ростом выпуска снижается. Поэтому они успешно вытеснили обычные тиристоры с узлами принудительной коммутации. Области применения импульсных преобразователей напряжения с новыми классами приборов также расширились. Быстро развиваются мощные импульсные регуляторы как для повышения, так и для понижения постоянного напряжения питания; импульсные преобразователи

часто используются в системах утилизации энергии возобновляемых источников (ветер, солнечная радиация).

Большие вложения делаются в производство энергии с использованием энергосберегающих технологий, когда возобновляемые первичные источники используются либо для возврата энергии в сеть, либо для подзарядки накопителя (аккумулятора) в установках с повышенной надежностью энергоснабжения. Появляются новые классы преобразователей для электроприводов с вентильно-индукторными двигателями (SRD — switched reluctanse drive). Эти преобразователи представляют собой многоканальные (число каналов обычно от трех до восьми) коммутаторы, обеспечивающие поочередно подключение обмоток статора двигателя с регулируемыми частотой и напряжением. Импульсные преобразователи получают широкое распространение в источниках питания бытовой аппаратуры, зарядных устройствах, сварочных агрегатах и целом ряде новых применений (пускорегулирующие устройства осветительных установок, электрофильтры и пр.).

Помимо совершенствования элементной базы силовых преобразовательных цепей на стратегию решения схемотехнических задач оказало огромное влияние развитие микроконтроллерных устройств и цифровых методов обработки информации.

37.2. СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КЛЮЧИ

Основными приборами энергетической электроники являются силовые диоды, тиристоры и силовые транзисторы, используемые в ключевом режиме. Современный силовой ключ — сложная схема, содержащая десятки и сотни параллельных структур. Ключи выпускаются как в виде отдельных приборов, так и в виде готовых функциональных мо-

Таблица 37.1. Силовые выпрямительные диоды

Тип прибора	I_{FSM}, кА	I_{RRM}, мА (не более)	U_{RRM}, В	U_{FM}, В (не более)	Масса, кг
В10, В25	0,5; 0,9	5	150÷1600	1,35	0,045÷0,084
В50	2,0	5	150÷1600	1,35	0,19
В200, В320	6,0	8; 20	150÷1600	1,35; 1,6	0,5; 1,1
В6-200	6,0	8	400÷1600	1,35	0,29
В500	9,0	30	150÷3800	2,0	0,31
В800	15,0	20	150÷2400	1,85	0,31
В2-320	6,5	20	150÷4000	1,9	0,15
В2-500	7,0	20	1000÷3000	1,8	0,47
В2-1600	28,0	100	300÷1600	1,5	0,4
Д112-10; Д112-16	0,21; 0,25	1,0; 1,5	100÷1400	1,35	0,006
Д112-25; Д122-32	0,3; 0,4	4,0; 6,0	100÷1400	1,35	0,006; 0,012
Д122-40; Д132-50	0,5; 1,0	6,0; 8,0	100÷1400	1,35	0,012; 0,027
Д132-63; Д132-80	1,1; 1,2	8,0; 10	100÷1400	1,35	0,027
Д133-400	7,0	50	1000÷4000	2,1	0,2
Д133-500	9,0	50	1000÷2800	1,7	0,2
Д143-630	10,0	50	1000÷4000	1,6	0,28
Д133-800; Д143-1000	12; 18,0	50; 75	400÷1600	2,1; 1,55	0,2; 0,28
Д143-800	15,0	50	1800÷2800	1,7	0,28
Д253-1600	28,0	100	400÷2000	1,5	0,55
Д141-100; Д151-125	1,9; 2,2	20	300÷1600	1,45; 1,35	0,1; 0,18
Д151-160; Д161-200	3,0; 5,5	20; 40	300÷1600	1,35	0,18; 0,3
Д161-250; Д161-320	6,4; 7,5	40; 50	300÷1600	1,35	0,3
Д171-400	10,5	50	300÷1600	1,5	0,51
ВЛ10; ВЛ25	0,5; 0,9	4,0; 5,0	600÷1200	1,35	0,045; 0,084
ВЛ50	2,0	8,0	600÷1200	1,35	0,19
ДЛ112-10; ДЛ112-16	0,21; 0,25	1,0; 1,5	400÷1500	1,35	0,006
ДЛ112-25; ДЛ112-32	0,27; 0,4	2,0; 4,0	400÷1500	1,35	0,006; 0,012
ДЛ122-40; Д132-50	0,5; 1,0	4,0	400÷1500	1,35	0,012; 0,027
ДЛ132-63; ДЛ132-80	1,1; 1,2	6,0; 8,0	400÷1500	1,35	0,027
ВЛ200; ВЛ320	6,0; 6,6	12; 20	600÷1200	1,35; 1,6	0,5; 1,1
ДЛ161-200; ДЛ171-320	5,5; 7,5	25	400÷1400	1,45	0,3; 0,51
ДЛ123-320; ДЛ133-500	5,5; 7,5	25	400÷1400	1,45	0,07; 0,2
ДЧ151-80; ДЧ151-100	2,4; 2,7	25	500÷1400	1,85; 1,55	0,18
ДЧ161-125; ДЧ161-160	4,5; 5,0	35	500÷1400	1,8; 1,45	0,29
ДЧ171-250; ДЧ171-320	8,0; 9,0	60	500÷1400	2,1; 1,65	0,51
ДЧ143-800; ДЧ143-1000	12,0; 14,5	40	600 ÷1800	3,0; 2,3	0,2
ВЧ2-160; ВЧ2-200	3,5; 4,3	35	100÷1000	1,75; 1,55	0,42

Примечания: 1. I_{FSM} — ударный неповторяющийся прямой ток; I_{RRM} — повторяющийся импульс обратного тока; U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; U_{FM} — импульсное падение напряжения в открытом состоянии.
2. ДЛ и ВЛ — лавинные диоды; ДЧ и ВЧ — диоды быстровосстанавливающиеся.

дулей. Особо следует отметить так называемые разумные кристаллы (Smart) и силовые интеллектуальные модули (IPM) — наиболее перспективные ключи недалекого будущего. Ниже представлена информация о самых современных силовых полупроводниковых ключах отечественных и зарубежных фирм.

ДИОДЫ

В зависимости от назначения силовые диоды делятся на низкочастотные, высокочастотные и импульсные. Основные параметры отечественных силовых выпрямительных диодов приведены в табл. 37.1.

Очень эффективны в сильноточных низковольтных выпрямителях и высокочастотных преобразователях выпрямительные диоды Шоттки. Например, диод MBR130LT3 фирмы MOTOROLA при токе $I_{пр}$ = 1 А имеет прямое напряжение $U_{пр}$ = 0,395 В, а диод MBRP60035CTL при $I_{пр}$ = 300 А имеет $U_{пр}$ = = 0,57 В.

В табл. 37.2 даны параметры подобных диодов, охватывающие практически весь диапазон напряжений и токов от 15 до 600 В и от 0,5 до 25 А.

Идеально работают в высокочастотных источниках вторичного электропитания (ИВЭП) и высоковольтных выпрямителях сверхбыстродействующие диоды. Они выпускаются на токи от единиц до сотен ампер и напряжения до 1500 В. Использованне передовой технологии на основе арсенида галлия позволило создать семейство диодов со сверхмалым временем восстановления ($t_{выкл}$ < 15 нс).

В табл. 37.3 даны некоторые типы диодов этого класса.

Кроме отдельных диодов выпускаются силовые модули, включающие в себя последовательно-параллельные сборки и схемы мостовых конфигураций.

В табл. 37.4, *а*, *б* представлена информация о подобных модулях фирмы Mitsubishi, содержащих обыкновенные диоды и быстродействующие с временем восстановления менее 200 нс.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Несмотря на появившуюся тенденцию сокращения применений биполярных транзисторов, они пока продолжают пользоваться популярностью у разработчиков электронных устройств. Мощные биполярные транзисторы охватывают диапазон мощностей от 1,75 до 250 Вт. Диапазон максимальных токов коллектора в пределах 1÷80 А, напряжений от десятков до 1500 В. Коэффициент усилеиия тока базы имеет значения от нескольких единиц — для высоковольтных приборов, до десятков тысяч — для составных транзисторов (по схеме Дарлингтона).

Таблица 37.2. Выпрямительные диоды Шоттки

Тип прибора	I_{FAV}, А	U_{RRM}, В	U_{FM}, В	I_{RRM}, мА
MBR0520LT1÷ MBR0540T1	0,5	20÷40	0,385÷0,51	0,25÷0,02
MBRS340T3; MBRS360T3; MBRD320÷D360	3	20÷60	0,45	0,2÷2
MBRD620CT÷ MBRD660CT	3 (на один анод)	20÷60	0,63	0,1
MBRD835L	8	35	0,51	1,4
MBRB1545CT	7,5 (на один анод)	45	0,84	0,1
MBRB2060CT÷ MBRB20200CT	10 (на одии аиод)	60÷200	0,9	0,15÷1
MBRB2515L; MBRB2535CTL; MBRB2545CT	12,5÷25	15÷45	0,45÷0,64	10; 15; 0,2
MBR2015CTL÷ MBR20200CT	10 (на однн анод)	15÷200	0,52÷0,92	0,1÷5
MBR251L	25	15	0,45	15
MBR2535CTL÷ MBR2545CT	12,5 (на один анод)	35; 45	0,55; 0,73	5; 0,2
MBR6015L÷6030L	60	15÷30	0,42	50
MBR6045	60	45	0,7	0,3
MBR8045	80	45	0,72	1
MBRP20030CTL; MBRP20045CT	100 (на один анод)	30; 45	0,52; 0,91	5; 0,5
MBRP60035CTL	300 (на один анод)	35	0,57	10
MBR240100V	40	100	0,95	0,1
MBR28045V	80	45	0,8	1

Примечание. I_{FAV} — средний ток в открытом состоянии; U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; U_{FM} — импульсное падение напряжения в открытом состоянии; I_{RRM} — максимальный обратный ток.

Таблица 37.3. Сверхвысокочастотные диоды

Тип прибора	I_{FAV}, А	U_{RRM}, В	U_{FM}, В	$t_{вкл}$, нс	$t_{выкл}$, нс
MBRS120T3	1	200	0,875	25	35
MBRS160T3	1	600	1,25	50	75
MBRS320T3	3	200	0,875	25	35
MBRS360T3	3	600	1,25	50	75
MBRD320	3	200	0,95	—	35
MBRHB840CT	4 (на один анод)	400	1,9	—	28
MBRB1620CT	8 (на один анод)	200	0,9	—	35
MBRB1660CT	То же	600	1,2	—	60
MBR1100E	1	100	1,5	75	100
MBR4100E	4	1000	1,53	75	100
MBR5150E	5	1500	2,0	175	130
MBR8100E	8	1000	1,8	—	100
MBR10120E	10	1200	1,9	135	150
MBR10150E	10	1500	1,9	135	150
MBR1520	15	200	1,05	—	35
MBR1540	15	400	1,25	—	60
MBR1560	15	600	1,5	—	60
MBR3040	30	400	1,5	—	100
MBR3080	30	800	1,9	—	110
MBR6040	60	400	1,5	—	100
MBRP20020CT	200	200	1,1	—	50
MBRP20040CT	200	400	1,75	—	75
BYT230PIV	30 (на один анод)	1000	1,9	—	200
BYT261PIV	60 (на один анод)	1000	1,9	—	200
1N4001÷1N4007	1	50÷1000	0,8	—	—
1N5400÷1N5408	3	50÷1000	1,2	—	—
MR750÷MR760 (для монтажа на печатной плате)	До 22	50÷1000	1	—	—
MBRP60035CTL	600	35	0,57	—	—
MGR1018	10	180	1,4	—	15
MGR2018CT	20	180	1,4	—	15
MGR2025CT	20	250	2,2	—	15

Примечание. I_{FAV} — средний ток в открытом состоянии; U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; U_{FM} — импульсное падение напряжения в открытом состоянии; $t_{вкл}$ — время включения; $t_{выкл}$ — время выключения.

Параметры отечественных силовых биполярных транзисторов и фирмы MOTOROLA приведены в табл. 37.5, *а*, *б*.

Следует отметнть и новые технологии для силовых биполярных транзисторов, в частности разработку фирмой MOTOROLA приборов серии Power Lux-D2, имеющих обратный диод и схему, предотвращающую режим насыщения (рис. 37.1). Параметры таких транзисторов приведеиы в табл. 37.6. Другой пример применения новых техиологий — разработка фирмой THOMSON биполярных транзисторов серии SUPERSWITCHII, в которых напряжение коллектор—эмиттер имеет положительный температурный коэффициент во всем диапазоне токов.

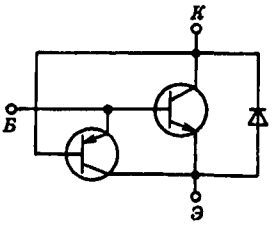


Рис. 37.1. Биполярный транзистор серии PowerLux-D2

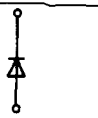
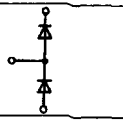
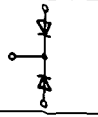
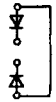
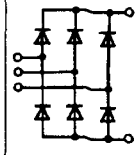
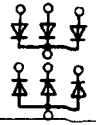
Силовые биполярные транзнсторы также выпускаются в виде модулей различной конфигурацни: отдельные ключи, последовательно-параллельные сборки, мостовые и полумостовые схемы. Диапазон токов до 600 А н напряжений до 1200 В. В табл. 37.7 приведены типы и электрнческие параметры некоторых модулей силовых биполярных транзисторов фирмы Mitsubishi.

Существует большое многообразие методов и схем управления силовыми биполярными транзисторами. Однако наиболее современны так называемые потеициальные формирователи импульсов управлеиия (драйверы), выпускаемые в интегральиом исполнении. В качестве примера приводятся схема драйвера для биполярного транзистора фирм MOTOROLA и THOMSON (рис. 37.2 и табл. 37.8), некоторые параметры гибридных интегральных драйверов для управления транзисториыми модулями фирмы Mitsubishi (табл. 37.8).

СТАТИЧЕСКИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Развитие технологии полевых транзисторов с управляющим переходом привело к созданию траизи-

Таблица 37.4, *а*. Диодные модули

Схема	U_{RRM}, В	I_{FAV}, А							
		20	30	40	60	100	150	250	500
	400	—	—	—	—	—	—	—	RM500HA-M
	800	—	—	—	—	—	—	—	RM500HA-H
	1200	—	—	—	—	—	—	—	RM500HA-24
	1600	—	—	—	—	—	—	—	RM500HA-2H
	400	—	RM30DZ-M	—	RM60DZ-M	RM100DZ-M	RM150DZ-M	RM250DZ-M	RM500DZ-M
	800	—	RM30DZ-H	—	RM60DZ-H	RM100DZ-H	RM150DZ-H	RM250DZ-H	RM500DZ-H
	1200	—	RM30DZ-24	—	RM60DZ-24	RM100DZ-24	RM150DZ-24	RM250DZ-24	RM500DZ-24
	1600	—	RM30DZ-2H	—	RM60DZ-2H	RM100DZ-2H	RM150DZ-2H	RM250DZ-2H	RM500DZ-2H
	400	—	RM30CZ-M	—	RM60CZ-M	RM100CZ-M	RM150CZ-M	RM250CZ-M	—
	800	—	RM30CZ-H	—	RM60CZ-H	RM100CZ-H	RM150CZ-H	RM250CZ-H	—
	1200	—	RM30CZ-24	—	RM60CZ-24	RM100CZ-24	RM150CZ-24	RM250CZ-24	—
	1600	—	RM30CZ-2H	—	RM60CZ-2H	RM100CZ-2H	RM150CZ-2H	RM250CZ-2H	—
	400	—	—	—	—	—	RM150UZ-M	RM250UZ-M	RM500UZ-M
	800	—	—	—	—	—	RM150UZ-H	RM250UZ-H	RM500UZ-H
	1200	—	—	—	—	—	RM150UZ-24	RM250UZ-24	RM500UZ-24
	1600	—	—	—	—	—	RM150UZ-2H	RM250UZ-2H	RM500UZ-2H
	400	RM10TA-M RM10TB-M	RM15TA-M RM15TB-M	RM20TPM-M	RM30TA-M RM30TB-M RM30TPM-M	RM50TC-M	RM75TC-M RM75TPM-M	—	—
	800	RM10TA-H RM10TB-H	RM15TA-H RM15TB-H	RM20TPM-H	RM30TA-H RM30TB-M RM30TPM-H	RM50TC-H	RM75TC-H RM75TPM-H	—	—
	1200	RM10TA-24	RM15TA-24 RM15TPM-24	RM20TA-24 RM20TPM-24	RM30TC-24	RM50TC-24	RM75TC-24 RM75TPM-24	—	—
	1600	RM10TA-2H	RM15TA-2H RM15TPM-2H	RM20TA-2H RM20TPM-2H	RM30TC-2H	RM50TC-2H	RM75TC-2H RM75TPM-2H	—	—
	2000	—	RM15TC-40	—	RM30TC-40	—	—	—	—
	300	—	—	—	RM60SZ-6S	RM100SZ-6S	—	—	—
		—	—	—	RM60SZ-6R	RM100SZ-6R	—	—	—

Примечание. U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; I_{FAV} — средний ток в открытом состоянии.

Таблица 37.4, *б*. Диодные модули быстродействующие

Схема	U_{RRM}, В	I_{FAV}, А						
		20 (25)	50	100	200	250	300	400
	450	—	—	—	—	RM250HA-10F	—	—
	600	RM20HA-12F	RM50HA-12F, RM50HG-12S	RM100HA-12F	—	—	—	—
	800	RM20HA-16F	RM50HA-16F	RM100HA-16F	—	—	—	—
	1000	RM20HA-20F	RM50HA-20F	RM100HA-20F	RM200HA-20F			RM400HA-20S
	1200	RM20HA-24F, RM25HG-24S	RM50HA-24F	RM100HA-24F	RM200HA-24F	—	RM300HA-24F	RM400HA-24S
	1400	—	—	—	—	—	—	RM400HA-28S
	1700	—	—	—				RM400HA-34S
	300	RM20CA-6S	RM50CA-6S	—	—	—	—	—
	500	—	—	—			RM300CA-9W	—
	600	RM20CA-12F, RM20CA-12S	RM50CA-12F, RM50CA-12S	RM100CA-12F	—	—	—	—
	800	RM20CA-16F	RM50CA-16F	RM100CA-16F	—	—	—	—
	1000	RM20CA-20F	RM50CA-20F, RM50CA-20S	RM100CA-20F	—	—	—	—
	1200	RM20CA-24F	RM50CA-24F	RM100CA-24F	—	—	—	—
	300	RM20C1A-6F	RM50C1A-6S	—	—	—	—	—
	600	RM20C1A-12F	RM50C1A-12F, RM501A-12S	RM100C1A-12F	—	—	—	—
	800	RM20C1A-16F	RM50C1A-16F	RM100C1A-16F	—	—	—	—
	1000	RM20CA-20F	RM50C1A-20F, RM50C1A-20S	RM100C1A-20F	—	—	—	—
	1200	RM20C1A-24F	RM50C1A-24F	RM100C1A-24F	—	—	—	—
	600	RM20DA-12F, RM20DA-12S	RM50DA-12F, RM50DA-12S	—	—	—	—	—
	800	RM20DA-16F	RM50DA-16F	—	—	—	—	—
	1000	RM20DA-20F	—	—	RM200DA-20F	—	—	—
	1200	RM20DA-24F	—	—	RM200DA-24F	—	—	—

Примечание: U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; I_{FAV} — средний ток в открытом состоянии.

Таблица 37.5, *а*. Силовые биполярные траизисторы

Параметр	Тип											
	2Т809А	2Т812А	2Т826Б	2Т828Б	2Т704А	2Т834В	2Т839А	2Т847А	2Т862Г	2Т886А	КТ840А	2Т845А
$U_{КЭ\ макс}$, В	200	350	600	600	—	300	700	350	400	800	400	400
$I_{К\ макс}$, А	3	10	1	5	2,5	15	10	15	15	10	6	5
$h_{21нас}$	5	6,5	2,5	5	3	100	3	8	9	5	5	6
$U_{КЭ\ нас}$, В	0,174	0,8	0,25	0,18	0,35	0,74	0,22	0,2	0,12	0,24	—	0,425
$t_{расс}$, мкс	1,5	—	—	—	—	9	7,5	3	3	6	—	6
$t_{сп}$, мкс	0,8	—	—	—	—	0,8	5	0,15	0,4	0,4	—	0,3

Примечание. $U_{КЭ\ макс}$ — максимальное напряжение коллектор—эмнттер; $I_{К\ макс}$ — максимальный коллекторный ток; $h_{21нас}$ — коэффициент передачи тока ключевого режима; $U_{КЭ\ нас}$ — напряженне коллектор—эмиттер в режиме насыщення; $t_{расс}$ — время рассасывания носителей при выключенни; $t_{сп}$ — время спада тока при выключении.

Таблица 37.5, *б*. Силовые биполярные транзисторы фирмы MOTOROLA

Тип		$I_{К\ макс}$, А	$U_{КЭ\ макс}$, В	$h_{21\ Э\ мин}/I_К$, 1/А	Резистивная нагрузка			f_T, Мгц
n-p-n	*p-n-p*				$t_{расс}$, мкс	$t_{сп}$, мкс	$I_к$, А	
TIP-49	MJES731	1	350	30/0,3	2	0,18	0,3	10
BUL-44	—	2	400	14/0,4	2,75	0,175	1	13
MJE1320	—	2	900	3/1	4	0,8	1	—
—	MJE9780	3	150	50/0,5	—	—	—	5
MJE13005	—	4	400	6/3	3	0,7	3	4
MJE18204	—	5	550	18/0,5	2,75	0,2	2	12
BU208A	—	5	700	2,5/4,5	8	0,4	4,5	4
TIP41C	TIP42C	6	100	15/3	0,4	0,15	3	3
MJE18006	—	6	450	14/0,5	3,2	0,13	3	14
MJE18008	—	8	450	16/1	2,75	0,18	2	13
MJE13009	—	12	400	6/8	3	0,7	8	4
BDW42	BDW47	15	100	1000/5	1	1,5	5	4
TIP35C	TIP36C	25	100	15/15	0,6	0,3	10	3
MJ16012	—	15	450	7/15	0,9	0,15	10	—
MJ10009	—	20	500	30/10	2	0,6	10	8
MJ11016	MJ11015	30	120	1000/20	—	—	—	4
BUX98A	—	30	450	8/16	3	0,8	16	—
MJ10023	—	40	400	50/10	2,5	0,9	20	—
MJ10016	—	50	500	10/40	2,5	1	20	—
MJ10021	—	60	250	75/15	3,5	0,5	30	—
BUS50	—	70	125	15/50	1,5	0,3	70	—
BUV18A	—	80	100	10/80	1,1	0,25	80	—

Примечание. $I_{К\ макс}$ — максимальный ток коллектора; $U_{КЭ\ макс}$ — максимальное напряженне коллектор—эмиттер; $h_{21\ Э\ мин}/I_К$ — миннмальный коэффициент передачн тока при заданном токе коллектора; $t_{расс}$ — время рассасывания носителей прн выключении; $t_{сп}$ — время спада тока при выключении; $I_К$ — заданное значение тока коллектора; f_T — частота единичного усиления.

сторов со статической индукцией (СИТ), название которых подчеркивает общность процессов управления током стока и током анода у ламп.

В производстве силовых СИТ лидерство принадлежит японской фирме Tokin. Самые мощные приборы имеют рабочие напряженія до 1500 В и токи стока до 180 А.

Таблица 37.6. Биполярные траизисторы PowerLux-D2

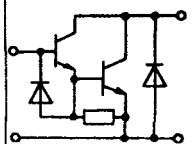
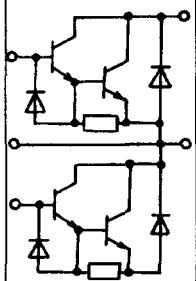
U_{CES}, В	I_C, А		
	2	3	4
700	BUL44D2, BUD44D2	—	BUL45D2
1000	MJE18002D2	—	MJE18004D2
1600	MJE18604D2	MJE18605D2	—

Примечание. U_{CES} — максимальное иапряжение коллектор—эмиттер; I_C — максимальный ток коллектора.

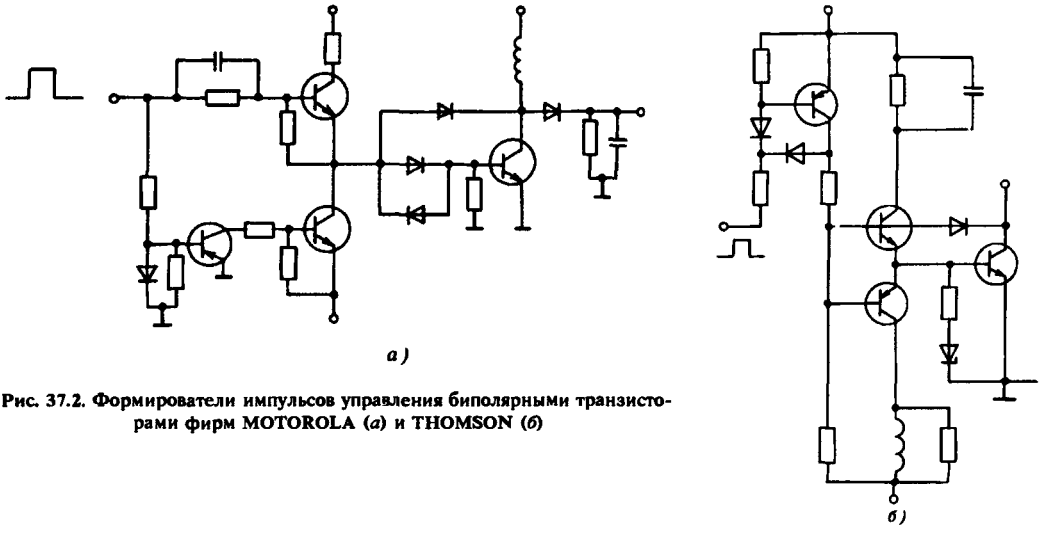
Несмотря на высокие показатели СИТ уступают другим мощным транзнсторам по чнслу выпускаемых типов. Различают нормально открытые и нормально закрытые тнпы транзисторов. Для последних применяется термин статический индукцнонный транзистор бнполярного тнпа (БСИТ), что подчеркнвает необходимость инжекции неосновных носнтелей через затвор для отпирания такого прибора.

В режнме инжекции сопротивление канала СИТ уменьшается до десятых и даже сотых долей ома, однако это ухудшает быстродействие ключа за счет необходимости рассасывания неосновных носителей. В отличие от других транзисторов СИТ имеют большую перегрузочную способность по току, оии защищены от воздействия статического электричества, лучше противостоят радиационному воздействию,

Таблица 37.7. Модули силовых биполярных транзисторов

Схема	U_{CB0}, В	I_C, А										
		15	30	50	75	100	150	200	300	400	500	600
	600	QM15HA-H	QM30HA-H	QM50HA-H	QM75HA-H	QM100HY-H	QM150HY-H	QM200HA-H	QM300HA-H	QM400HA-H	QM500HA-H	—
	1000	—	QM30HY-2H	QM50HY-2H	—	QM100HY-2H	QM150HY-2H	QM200HA-2H	QM300HA-2H	QM400HA-2H	—	QM600HA-2H
	1200	—	—	—	—	—	—	QM200HA-24	QM300HA-24	QM400HA-24	—	QM600HA-24
	600	—	QM30DY-H	QM50DY-H	QM75DY-H	QM100DY-H(K)	QM150DY-H(K)	QM200DY-H(K)	—	—	—	—
	1000	—	QM30DY-2H	QM50DY-2H	QM75DY-2H	QM100DY-2H(K)	QM150DY-2H(K)	QM200DY-2H	QM300DY-2H	—	—	—
	1200	—	QM30DY-24	QM50DY-24	QM75DY-24	QM100DY-24(K)	QM150DY-24(K)	QM200DY-24	QM300DY-24	—	—	—

Примечание. U_{CB0} — максимальное напряжение коллектор—база; I_C — максимальный ток коллектора.



а) *б)*

Рис. 37.2. Формирователи импульсов управления биполярными транзисторами фирм MOTOROLA (*а*) и THOMSON (*б*)

Таблица 37.8. *Интегральные драйверы управления модулями силовых транзисторов*

Тип драйвера	Функция	Предельная токовая нагрузка управляемого ключа	Выходные токи, А		Напряжение источника питания, В		Примечание
			$I_{Б1}$	$I_{Б2}$	максимальное	типовое	
M 57 903 L	Управление схемой Дарлингтона	Один ключ на 50 А	0,9	2	14	10	Требуются внешние диоды для обратного смещения
M 57 904 L		Три ключа на 50 А	0,65	2	14	10	
M 57 215 L		Один ключ на 75 А	0,9	2	14, −5	10, −3	
M 57 215 BL		Один ключ на 75 А	0,9	2	14, −5	10, −3	
M 57 915 L	Управление схемой Дарлингтона	Один ключ на 20 А	0,9	2	14	8	Требуются внешние диоды для обратного смещения
M 57 916 L		Два ключа на 20 А	0,65	2	14	8	
M 57 917 L		Один ключ на 50 А	0,9	2	14	8	
M 57 925 L	Управление транзисторами с высоким коэффициентом передачи	Один ключ на 50 А	0,9	2	14, −5	10, −4	—
M 57 950 L		Один ключ на 50 А	0,9	2	14, −5	8, −3	
M 57 951 L		Три ключа на 50 А	0,3	2	14	10	
M 57 955 L		Один ключ на 50 А	0,3	1,3	14, −5	10, −3	

Примечание. $I_{Б1}$ — положительный ток базы; $I_{Б2}$ — отрицательный ток базы.

Таблица 37.9. Статические индукционные транзисторы

Тип прибора	$U_{ЗИ\ макс}$, В	$U_{СИ\ макс}$, В	I_C, А	$I_{С\ имп}$, А	$P_{рас}$, Вт	S^*, А/В	B^{**}	$R^{**}_{СИ\ отк}$, Ом	$t^*_{пер}$, нс
КП801А	−35	75	5	—	60	0,6	—	—	—
КП801Б	−35	75	5	—	60	0,45	—	—	—
КП801В	40	110	8	—	100	0,8	—	—	—
КП801Г	−40	140	8	—	100	0,8	—	—	—
КП802А	−35	500	3,5	—	40	0,8	—	—	—
КП802Б	−30	450	3,5	—	40	0,8	—	—	—
2П802А	−35	500	3,5	—	40	0,8	—	—	—
КП926А	−25	450	16,5	30	50	2,0	12	0,1	40
КП926Б	−20	400	16,5	30	50	2,0	12	0,1	40
КП926В	−20	300	16,5	30	50	2,0	12	0,1	40
2П926А	−25	450	16,5	30	50	2,0	12	0,1	40
2П926Б	−20	400	16,5	30	50	2,0	12	0,1	40
КП938А	−5	500	15	20	50	—	20	0,07	—
КП938Б	−5	500	15	20	50	—	20	0,07	—
КП938В	−5	450	15	20	50	—	20	0,1	—
КП938Г	−5	400	15	20	50	—	20	0,1	—
КП938Г	−5	300	15	20	50	—	20	0,1	—
КП937А	−20	450	17,5	30	—	2	20	0,07	100

Окончание табл. 37.9

Тип прибора	$U_{ЗИ\ макс}$, В	$U_{СИ\ макс}$, В	I_C, А	$I_{C\ имп}$, А	$P_{рас}$, Вт	S, А/В	B	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$t_{пер}$, нс
КП931А	20	800	5	—	20	—	12	0,15	100
КП931Б	20	600	5	—	20	—	12	0,15	100
КП931В	20	400	5	—	20	—	12	0,15	100
КП934А	20	500	15	—	40	—	12	0,1	100
КП934Б	20	450	15	—	40	—	12	0,1	100
КП934В	20	300	15	—	40	—	12	0,1	100
ПК-20	−13	150	30	50	55	—	30	0,03	—
ПК-24	−8	150	15	—	40	—	50	—	—
ПК-16	−25	800	10	20	40	—	5	0,2	—
ПК-16-1	−25	700	10	20	40	—	5	0,2	—
ПК-16-2	−25	600	10	20	40	—	5	0,2	—
ПК-22	−20	450	30	—	100	—	12	—	—
ПК-22-1	−25	800	20	—	120	—	6	—	—
ПК-23	−25	825	20	—	120	—	5	—	—

Примечание. $U_{ЗИ\ макс}$ — максимальное напряжение затвор—исток; $U_{СИ\ макс}$ — максимальное напряжение сток—исток; I_C — средний ток стока; $I_{C\ имп}$ — импульсный ток стока; $P_{рас}$ — максимальная рассеиваемая мощность; S — коэффициент передачи (крутизна) транзистора; B — коэффициент передачи тока; $t_{пер}$ — время переключения; $R_{СИ\ отк}$ — сопротивление сток—исток открытого прибора.

Таблица 37.10. Мощные СИТ фирмы Tokin

Тип СИТ	$U_{СИ\ макс}$, В	$I_{C\ макс}$, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$C_{вх}$, пФ	$P_{рас}$, Вт
2SK180; 2SK182E	600	60	1	8 000	500, 1000
TS300	600	200	0,3	25 000	3000
2SK183HE; 2SK183H	1200	60	1,5	8 000	500, 1000
TS300H	1200	180	0,5	25 000	3000
2SK183VE; 2SK183V	1500	60	1,5	8 000	500, 1000
TS300V	1500	180	0,5	25 000	3000

Примечание. $U_{СИ\ макс}$ — максимальное напряжение сток—исток; $I_{C\ макс}$ — максимальный ток стока; $R_{СИ\ отк}$ — сопротивление канала транзистора в открытом состоянии; $C_{вх}$ — входная емкость транзистора; $P_{рас}$ — максимальная рассеиваемая мощность.

могут работать как в полевом, так и в биполярном полевом режиме (для последнего характерны более высокие значения коэффициента передачи, чем у аналогичных биполярных транзисторов).

Параметры отечественных СИТ и выпускаемых фирмой Tokin приведены в табл. 37.9 и 37.10.

Формирователи импульсов управления СИТ должны обеспечивать контроль за отрицательным смещением (для нормально открытых приборов), а также возможность перехода от полевого режима работы к биполярно полевому. Схема драйвера для СИТ 2SK183 фирмы Tokin приведена на рис. 37.3.

МОЩНЫЕ МДП-ТРАНЗИСТОРЫ

Современные мощные МДП-транзисторы представляют собой приборы с вертикальной структурой, состоящей из сотен параллельно включенных полевых структур. Это позволяет получать высоковольтные транзисторы с минимальным значением прямого сопротивления во включенном состоянии. Для работы в ключевом режиме выпускаются транзисторы на напряжения от 12 до 1500 В с диапазоном токов от 2 до 200 А при сопротивлении канала от 0,0055 до 3 Ом.

Параметры n- и p-канальных транзисторов отечественного производства представлены в табл. 37.11. Приборы третьего и четвертого поколения фирмы Hitachi представлены для сравнения в табл. 37.12.

Выпускаются также силовые модули на МДП-транзисторах различной конфигурации на рабочие напряжения до 1000 В и токи до 200 А. Типовые варианты таких модулей фирмы Semikron представлены в табл. 37.13.

В качестве передовых технологий мощных МДП-транзисторов следует упомянуть приборы серии HEXSense фирмы IR. Наличие дополнительного вывода контроля тока стока позволяет успешно согласовывать ключевой прибор с системой управления без дополнительных датчиков тока. Кроме этого следует отметить так называемые транзисторы на "разумных" кристаллах. Это технологии Smartfet фирмы IR, Omnifets фирмы Thomson и др. В транзисторах этих технологий обеспечивается ограничение тока при коротких замыканиях, защита от перенапряжений, защита от электростатического заряда, а также контроль за температурой кристалла.

Весьма широк спектр формирователей сигналов управления мощными МДП-транзисторами. Среди наилучших решений можно отметить драйвер фир-

Таблица 37.11. Мощные МДП-транзисторы

Тип	$U_{СИ\ макс}$, В	$U_{ЗИ\ макс}$, В	$I_С$, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	S, А/В	$P_{рас}$, Вт	$C_{ЗИ}$, пФ	$C_{СИ}$, пФ	$C_{ЗС}$, пФ	$t_{вкл}$, нс	$t_{выкл}$, нс
КП909К	50	25	10	1,3	0,65	60	190	—	—	—	—
КП911	50	25	5	2,5	0,40	30	70	—	—	4	4
2П912А	100	20	20	0,6	1,5	40	500	250	16	100	100
2П912Б	60	20	25	0,3	1,5	40	500	250	16	100	100
2П913А	50	20	19	0,5	1,6	100	390	150	8	10	5
2П913Б	50	20	14	0,5	1,6	100	390	150	8	10	5
2П918А	45	20	8	2,0	0,6	45	120	55	3,5	10	15
2П918Б	45	20	6,5	2,0	0,6	45	120	55	3,5	10	15
2П920А	50	25	22	0,5	2,0	130	390	150	6	60	80
2П920Б	50	25	16	0,8	2,0	130	390	150	6	60	80
КП921А	45	20	10	0,1	1,0	15	1700	—	—	60	70
2П922А	100	30	10	0,17	1,4	75	1700	—	600	—	—
2П922Б	100	30	10	0,3	1,4	75	1700	—	600	—	—
КП923А	50	20	12	0,6	1,0	100	400	—	—	—	—
КП923Б	50	20	8	0,6	0,7	100	400	—	—	—	—
КП923В	50	20	6	1,5	0,55	50	220	—	—	—	—
КП923Г	50	20	4	1,5	0,35	50	220	—	—	—	—
КП928А	50	25	21	0,4	1,8	250	530	160	50	—	—
КП928Б	55	25	16	0,4	1,8	250	530	160	50	—	—
КП933А	45	20	12	—	1,1	160	210	—	—	—	—
КП933Б	45	20	8	—	0,8	160	210	—	—	—	—
КП703А (p-канал)	—150	—30	12	0,85	0,8	60	1500	200	30	40	30
КП703Б	—100	—30	12	0,7	0,8	60	1500	200	30	40	30
КП704	200	20	10	0,3	10	75	1350	100	250	80	350

Окончание табл. 37.11

Тип	$U_{СИ\ макс}$, В	$U_{ЗИ\ макс}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	S, А/В	$P_{рас}$, Вт	$C_{ЗИ}$, пФ	$C_{СИ}$, пФ	$C_{ЗС}$, пФ	$t_{вкл}$, нс	$t_{выкл}$, нс
КП701А	500	25	9	1,9	1,7	40	1100	120	22	40	45
КП701Б	400	25	9	1,7	1,7	40	1100	120	22	40	45
КП702А	300	30	14	0,7	1,85	50	950	150	7	30	50
КП705А	1000	30	6	3,7	1,5	125	1500	140	20	40	60
КП705Б	800	30	7	2,5	1,5	125	1500	140	20	40	60
КП706А	500	30	22	0,64	2,3	100	2500	300	50	70	60
КП706Б	400	30	22	0,44	2,3	100	2500	300	50	70	60
КП803А	1000	30	3,0	4,5	0,8	60	3000	60	10	50	70
КП803Б	800	30	3,0	4,0	0,8	60	3000	60	10	50	70
КП707А	800	20	15	4,0	1,6	—	1600	600	45	80	80
КП707Б	600	20	20	2,0	1,6	—	1600	600	45	80	80
КП707В	400	20	30	1,0	1,6	—	1600	600	45	80	80
КП707А1	800	20	15	4,0	—	—	—	—	—	—	—
КП707В1	400	20	30	1,0	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. $U_{СИ\ макс}$ — максимальное напряжение сток—исток; $U_{ЗИ\ макс}$ — максимальное напряжение затвор—исток; I_C — максимальный ток стока; $R_{СИ\ отк}$ — сопротивление канала транзистора в открытом состоянии; S — коэффициент передачи (крутизна) транзистора; $P_{рас}$ — максимальная рассеиваемая мощность; $C_{ЗИ}$ — емкость затвор—исток; $C_{СИ}$ — емкость сток—исток; $C_{ЗС}$ — емкость затвор—сток; $t_{вкл}$ — время включения; $t_{выкл}$ — время выключения.

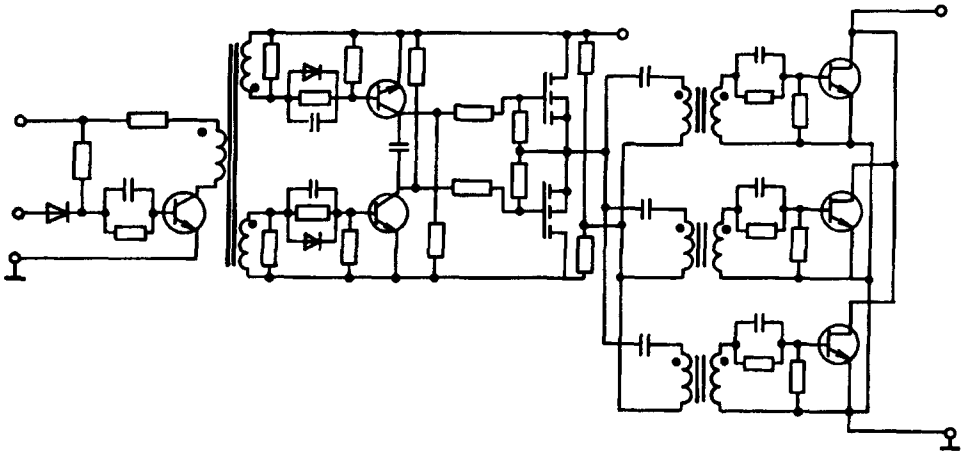


Рис. 37.3. Формирователь импульсов управления СИТ

Таблица 37.12. Мощные МДП-транзисторы фирмы Hitachi

Дискретные мощные низковольтные МДП-транзисторы

Тип прибора	Тип корпуса	Технология	$U_{СИ}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$C_{вх}$, пФ
2SK1579	UPAK	D III/N-ch.	12	2	0,25	110
2SJ244	UPAK	D III/P-ch.	12	2	0,5	130
2SK1763	DPAK	D III/N-ch.	30	2,5	0,27	155
2SJ234	DPAK	D III/P-ch.	30	2,5	0,30	245
2SK1093	TO-220FM	D III/N-ch.	60	10	0,12	400
2SJ175	TO-220FM	D III/P-ch.	60	10	0,13	900
2SK1666	TO-3PFM	D III/N-ch.	60	45	0,016	3950
2SJ218	TO-3PFM	D III/P-ch.	60	45	0,033	3800
2SK2121	TO-3P	D IY/N-ch.	60	50	0,008	8330

Транзисторные сборки мощных низковольтных МДП-транзисторов

Тнп прибора	Тип корпуса	Технология	$U_{СИ}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$C_{вх}$, пФ
4AK15	SP-10	D III/N-ch.	60	8	0,055	860
4AK17	SP-10	D III/N-ch.	60	10	0,033	1400
4AM12	SP-10	D III/N-ch.	60	8	0,06	860
		D III/P-ch.	60	8	0,09	1400
6AM13	SP-12TA	D III/N-ch.	60	10	0,06	860
		D III/P-ch.	60	10	0,09	1400

Мощные МДП-транзисторы на средние напряжения

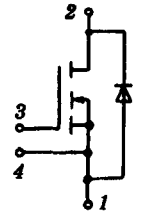
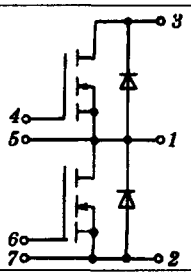
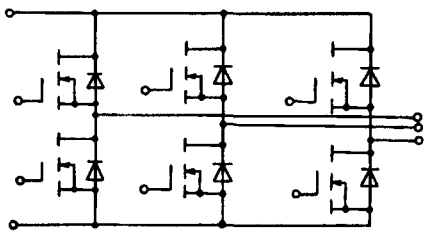
Тип прибора	Тип корпуса	Технология	$U_{СИ}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$C_{вх}$, пФ
2SK1518	TO-3P	D III/N-ch.	500	20	0,22	3050
2SK1520	TO-3PL	D III/N-ch.	500	30	0,16	5800
2SK1522	TO-3PL	D III/N-ch.	500	50	0,085	8700
2SK685	TO-3P	D II/N-ch.	1000	5	1,5	1900
2SK1316	LDPAK	D III/N-ch.	500	8	0,6	1150
2SK1528	LDPAK	D III/N-ch.	900	4	3,0	740
2SK1773	TO-3P	D III/N-ch.	1000	5	1,5	1700

Мощные высоковольтные МДП-транзисторы

Тип прибора	Тип корпуса	Технология	$U_{СИ}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, Ом	$C_{вх}$, пФ
2SK1317	TO-3P	D/N-ch.	1500	2,5	9,0	990
2SK1835	TO-3P	D/N-ch.	1500	4,0	4,6	1700

Примечание. $U_{СИ}$ — максимальное напряженне сток—исток; I_C — максимальный ток стока; $R_{СИ\ отк}$ — сопротивление канала транзистора в открытом состоянии; $C_{вх}$ — входная емкость.

Таблица 37.13. Силовые модули МДП-транзисторов

Тип	Схема	$U_{СИ}$, В	I_C, А	$R_{СИ\ отк}$, мОм	$P_{рас}$, Вт
SKM111AR		100	200	8,5	700
SKM121AR		200	130	20	700
SKM141		400	60	75	625
SKM151		500	48	120	625
SKM151F		500	56	110	700
SKM181		800	36	240	700
SKM181F		800	34	320	700
SKM191		1000	28	370	700
SKM191F		1000	28	420	700
SKM214A		100	120	13	400
SKM224A		200	80	30	400
SKM244F		400	45	100	400
SKM254F		500	35	170	400
SKM284F		800	20	480	400
SKM294F		1000	18	630	400
SKM651F		500	10	660	125
SKM652F		500	19	330	227
SKM681F		800	6	1920	125
SKM682F		800	11	960	227
SKM691F		1000	5	2520	125
SKM692F		1000	9,5	1260	227

Примечание. $U_{СИ}$ — максимальное напряжение сток—исток; I_C — максимальный ток стока; $R_{СИ\ отк}$ — сопротивление канала транзисторов в открытом состоянии; $P_{рас}$ — максимальная рассеиваемая мощность; 1÷7 — номера выводов.

мы IR для практически неограниченной скважности, представленный на рис. 37.4 и использующий в качестве развязки импульсный трансформатор. Наибольшее применение находят драйверы потенциального типа с запуском от оптопары и изготовленные в виде отдельной микросхемы. Для примера приводится схема гибридного драйвера фирмы Mitsubishi (рис. 37.5) и фирмы MOTOROLA (рис. 37.6).

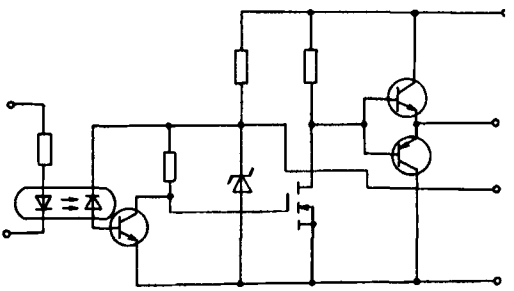


Рис. 37.5. Схема гибридного драйвера фирмы Mitsubishi

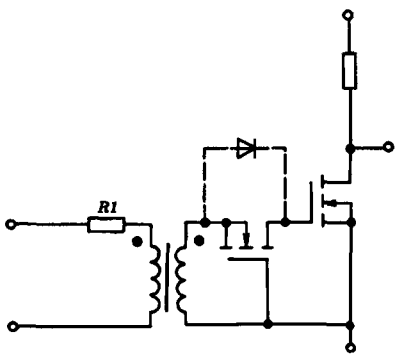


Рис. 37.4. Формирователь импульсов управления МДП-транзистором

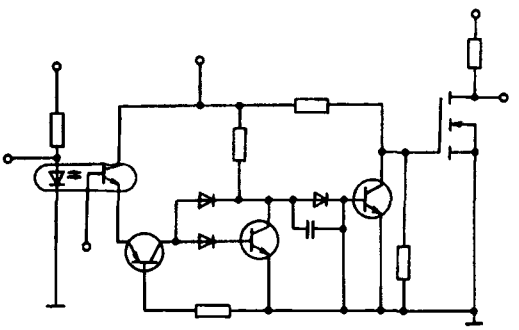
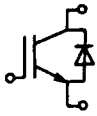
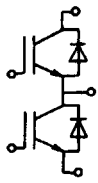
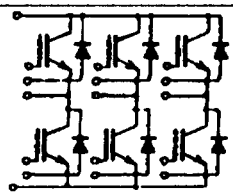
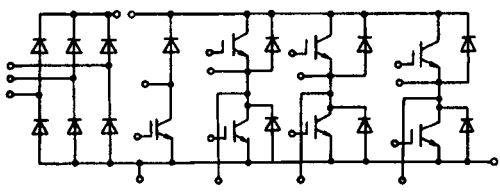


Рис. 37.6. Драйвер управления МДП-транзистором фирмы MOTOROLA

Таблица 37.14. Модули IGBT фирмы Mitsubishi

Схема	U_{CES}, В	I_C, А			
		10	15	20	25, 30
	250	—	—	—	—
	600	—	—	—	—
	1200	—	—	—	—
	1400	—	—	—	—
	1700	—	—	—	—
	2500	—	—	—	—
	3300	—	—	—	—
	600	—	—	—	—
	1200	—	—	—	—
	1400	—	—	—	—
	1700	—	—	—	—
	2500	—	—	—	—
	3300	—	—	—	—
	600	—	CM15 TF-12H	CM20 TF-12H	CM30 TF-12H
	1200	—	CM15 TF-24H	CM20 TF-24H	CM30 TF-24H
	600	CM10(1) MD-12H	CM15(1) MD-12H	CM20(1) MD-12H	CM30(1) MD-12H
	1200	CM10 MD-24H	CM15 MD-24H	—	CM25 MD-24H

Примечание. U_{CES} — максимальное напряжение коллектор—эмиттер; I_C — максимальный ток коллектора.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Несмотря на большие успехи в развитии мощных МДП-транзисторов, по предельным энергетическим показателям они уступают биполярным транзисторам и СИТ. Это прежде всего определяется относительно высоким сопротивлеиием каиала траизистора при больших рабочих напряжениях. С другой стороны, основным иедостатком силовых биполярных транзисторов является низкий коэффициент усиления тока базы и низкая теплостойкость. В значительной мере эти иедостатки устраняет объединеиная структура полевого и биполярного транзистора. Известны как дискретные составные структуры (так называемые BIMOS-модули), так и монолитные технологии приборов IGBT. Технологически такой транзистор изготавливается на основе процессов, аналогичных процессам изготовления мощных МДП-транзисторов.

На сегодняшний день серийно выпускаются приборы третьего поколения или улучшенной технологии второго поколения на рабочие напряжения до 1600 В и токи до 600 А. Однако технология приборов IGBT весьма динамична, и уже известны опытные разработки фирмы Mitsubishi по транзисторам серии CM1200HA50H иа ток 1200 А и напряжение 2,5 кВ, а также серии CM400ДУ-66H на ток 400 А и напряжение 3,3 кВ.

По частотным свойствам различают приборы IGBT со средней скоростью переключения (Standart Speed) порядка единиц килогерц, скоростные (Fast

третьего поколения

50	75	100	150	200	300	400, 450	600	800	1000, 1200
—	—	—	—	—	—	CM450 HA-5F	CM600 HA-5F	—	—
—	—	—	—	—	CM300 HA-12H	CM400 HA-12H	CM600 HA-12H	—	—
—	—	—	—	CM200 HA-24H	CM300 HA-24H	CM400 HA-24H	CM600 HA-24H	—	CM1000 HA-24H
—	—	—	—	—	—	CM400 HA-28H	CM600 HA-28H	—	CM1000 HA-28H
—	—	—	—	—	—	CM400 HA-34H	CM600 HA-34H	—	CM1000 HA-34H
—	—	—	—	—	—	—	—	CM800 HA-50H	CM1200 HA-50H
—	—	—	—	—	—	—	—	CM800 HA-66H	CM1200 HA-66H
CM50 DY-12H	CM75 DY-12H	CM100 DY-12H	CM150 DY-12H	CM200 DY-12H	CM300 DY-12H	CM400 DY-12H	—	—	—
CM50 DY-24H	CM75 DY-24H	CM100 DY-24H	CM150 DY-24H	CM200 DY-24H	CM300 DY-24H	—	—	—	—
CM50 DY-28H	CM75 DY-28H	—	—	CM200 DY-28H	CM300 DY-28H	—	—	—	—
—	—	—	—	CM200 DY-34H	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	CM400 DY-50H	—	—	—
—	—	—	—	—	—	CM400 DY-66H	—	—	—
CM50 TF-12H	CM75 TF-12H	CM100 TF-12H	CM150 TF-12H	—	—	—	—	—	—
CM50 TF-24H	CM75 TF-24H	CM100 TF-24H	—	—	—	—	—	—	—
CM50(1) MD-12H	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

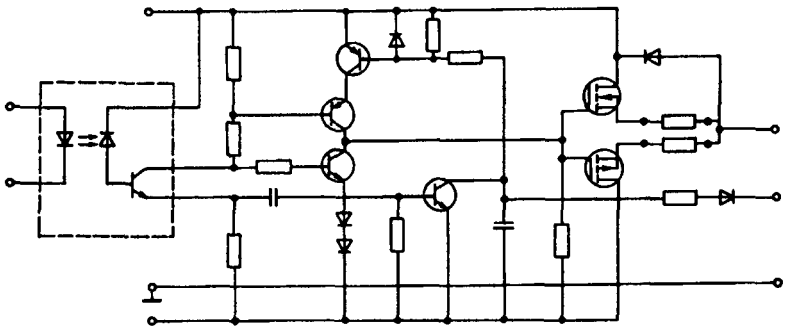


Рис. 37.7. Схема драйвера IGBT фирмы TOSHIBA

Speed) до 10 кГц и сверхскоростные (Ultra Fast) до 100 кГц. Создание последних стало возможным благодаря так называемой технологии с буферным слоем, при этом напряжение на открытом ключе относительно велико (порядка 3 В).

Приборы IGBT выпускаются как в отдельном, так и в модульном исполнеиии. Конфигурация некоторых модулей и их электрические характеристики приведеиы на примере приборов третьего поколения фирмы Mitsubishi (табл. 37.14 и 37.15).

Для управления приборами IGBT можно использовать те же выходные формирователи, что и для мощных МДП-транзисторов. Однако дополнительио в схему драйвера включаются элементы, ограничивающие скорость переключения прибора, а также узел защиты от токов короткого замыкания. В качестве примера на рис. 37.7 приведена схема драйвера для IGBT фирмы TOSHIBA. Параметры некоторых гибридных драйверов управления IGBT фирмы Mitsubishi приведены в табл. 37.16.

СИЛОВЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОДУЛИ

Силовые интеллектуальные модули (IPM) изготавливаются на базе модулей IGBT третьего поколения, для которых характерны пониженные напряжения открытого состояния (порядка 2,5 В даже для приборов с рабочим напряжением 1200 В). Они имеют встроенную защиту от перегрузок по току и температуре, обеспечивают функцию защиты от перенапряжения, обладают способностью в течение определениого промежутка времени следить за процессами короткого замыкания в схеме, ограничивая рост температуры и напряжения.

Параметры и конфигурация некоторых IPM фирмы Mitsubishi представлены в табл. 37.17.

ТИРИСТОРЫ

Тиристоры, применяемые в энергетической электронике, подразделяются на незапираемые (однооперационные), запираемые (двухоперационные), проводящие в обратном иаправлении (тиристоры—диоды), а также симметричные (триаки). Основные параметры отечественных тиристоров приведены в табл. 37.18.

Особо следует отметить динамичное развитие технологии многоячейковых структур большого диаметра двухоперационных тиристоров (GTO). Данные приборы по предельно переключаемой мощности, блокируемому напряжению, устойчивости к перегрузкам приближаются к однооперационным тиристорам, а по способу управления — к биполярным и полевым транзисторам. У наиболее мощных GTO предельное прямое блокируемое напряжение составляет 4,5 кВ, а максимально запираемый анодный ток 3 кА. Новейшие разработки фирмы Mitsubishi серии FG6000AU-D увеличивают эти параметры соответственно до 6 кВ и 6 кА. В табл. 37.19 представлены основные параметры мощных двухоперационных гиристоров ведущих зарубежных фирм.

Кроме отдельных тиристоров выпускаются силовые модули, включающие в себя также и диоды (как в виде последовательно или параллельно включенных вентилей, так и в виде однофазных и трехфазных мостовых конфигураций). Параметры некоторых силовых диодно-тиристорных модулей фирмы Mitsubishi приведены в табл. 37.20.

Предельная переключаемая мощность GTO достигается лишь в случае, если правильно задан режим его работы как по анодной цепи, так и по цепи управлеиия. Среди блоков, входящих в структуру формирователя управляющих импульсов, наиболее сложен формирователь импульсов на выключение тиристора. Он должен вырабатывать довольно большую амплитуду тока выключения, которая для наиболее мощных приборов может достигать нескольких сотен ампер. Типовая схема формирователей импульсов управления для мощных GTO представлена на рис. 37.8.

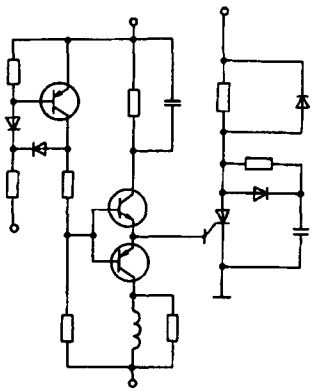


Рис. 37.8. Схема формирователя импульсов управления GTO

ТИРИСТОРЫ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Дальнейшее развитие силовой электроники невозможно без совершенствования существующих и разработки новых типов управляемых ключевых приборов. К новым типам тиристоров следует отнести статический индукционный тиристор (SITh), называемый также тиристором с электростатическим управлением (FCT). Данные приборы имеют малые времена включения и выключения, высокие динамические параметры di/dt и du/dt, а также быстро увеличивающиеся предельно переключаемые токи и напряжения. У наиболее мощных японских индукционных тиристоров эти параметры достигают 600 А и 2000 В, а у опытных образцов даже 2200 А и 4000 В. Параметры некоторых типов японских индукционных тиристоров приведены в табл. 37.21. В России данная технология находится в стадии разработки. Различают как нормально открытые, так и нормально закрытые индукционные тиристоры. По сравнению с запираемыми тиристорами индукционные имеют ряд преимуществ: более высокие предельные параметры по току и напряжению, более низкое падение напряжения в проводящем со-

Таблица 37.15. Параметры модулей IGBT фирмы Mitsubishi третьего поколения

Тип прибора	Предельные параметры			Электрические характеристики									Обратный диод		Тепловые и механические параметры			
	U_{CES}, В	I_C, А	P_C, Вт	$U_{CE(sat)}$, В		C_{ies}, нФ	C_{oes}, нФ	C_{res}, нФ	$t_{d(on)}$, нс	t_r, нс	$t_{d(off)}$, нс	t_f, нс	U_f, В	t_{rr}, нс	$R_{th(c-f)}$, °С/Вт	IGBT	Диод	Масса, г
				типовое	макси-мальное											$R_{th(j-c)}$, °С/Вт		
Модули IGBT на напряжение 250 В																		
CM450HA-5F	250	450	735	1,2	1,7	132	6	4,5	1200	2700	900	500	2,0	300	0,09	0,17	0,23	270
CM600HA-5F	250	600	960	1,2	1,7	165	7,5	5,6	1000	4000	1000	500	2,0	300	0,04	0,13	0,19	400
Модули IGBT на напряжение 600 В																		
CM15TF-12H	600	15	100	2,1	2,8	1,5	0,5	0,3	120	300	300	300	2,8	110	0,55	1,3	3,5	150
CM20TF-12H	600	20	125	2,1	2,8	2	0,7	0,4	120	300	300	300	2,8	110	0,55	1	3,5	150
CM30TF-12H	600	30	150	2,1	2,8	3	1,1	0,6	120	300	300	300	2,8	110	0,35	0,8	2	260
CM50DY-12H	600	50	250	2,1	2,8	5	1,8	1	200	300	200	300	2,8	110	0,15	0,5	1	190
CM50TF-12H	600	50	250	2,1	2,8	5	1,8	1	200	300	200	300	2,8	110	0,25	0,5	1	390
CM75DY-12H	600	75	310	2,1	2,8	7,5	2,6	1,4	120	300	200	300	2,8	110	0,15	0,4	0,9	190
CM75TF-12H	600	75	310	2,1	2,8	7,5	2,6	1,4	120	300	200	300	2,8	110	0,2	0,4	0,9	540
CM100DY-12H	600	100	400	2,1	2,8	10	3,5	2	120	300	200	300	2,8	110	0,15	0,31	0,7	190
CM100TF-12H	600	100	400	2,1	2,8	10	3,5	2	120	300	200	300	2,8	110	0,2	0,31	0,7	540
CM150DY-12H	600	150	600	2,1	2,8	15	5,3	3	200	550	300	300	2,8	110	0,13	0,21	0,47	270
CM150TF-12H	600	150	600	2,1	2,8	15	5,3	3	200	550	300	300	2,8	110	0,2	0,21	0,47	830
CM200DY-12H	600	200	780	2,1	2,8	20	7	4	200	550	300	300	2,8	110	0,13	0,16	0,35	270
CM300HA-12H	600	300	1100	2,1	2,8	30	10,5	6	350	600	350	300	2,8	110	0,04	0,11	0,24	400
CM300DY-12H	600	300	1100	2,1	2,8	30	10,5	6	350	600	350	300	2,8	110	0,13	0,11	0,24	270
CM400HA-12H	600	400	1500	2,1	2,8	40	14	8	350	600	350	300	2,8	110	0,04	0,085	0,18	400
CM400DY-12H	600	400	1500	2,1	2,8	40	14	8	350	600	350	300	2,8	110	0,09	0,085	0,18	400
CM600HA-12H	600	600	2100	2,1	2,8	60	21	12	350	700	350	300	2,8	110	0,035	0,06	0,12	560

Окончание табл. 37.15

Тип прибора	Предельные параметры			Электрические характеристики									Обратный диод		Тепловые и механические параметры			
	U_{CES}, В	I_C, А	P_C, Вт	$U_{CE(sat)}$, В		C_{ies}, нФ	C_{oes}, нФ	C_{res}, нФ	$t_{d(on)}$, нс	t_r, нс	$t_{d(off)}$, нс	t_f, нс	U_f, В	t_{rr}, нс	$R_{th(c-f)}$, °С/Вт	IGBT	Диод	Масса, г
				типовое	максимальное											$R_{th(j-c)}$, °С/Вт		
Модули IGBT на напряжение 1200 В																		
CM15TF-24H	1200	15	150	2,5	3,4	3	1,1	0,6	100	200	150	350	3,5	250	0,35	0,8	1,4	150
CM20TF-24H	1200	20	250	2,5	3,4	4	1,4	0,8	100	200	150	350	3,5	250	0,35	0,63	1,4	260
CM30TF-24H	1200	30	310	2,5	3,4	6	2,1	1,2	100	200	150	350	3,5	250	0,25	0,5	1,4	390
CM50DY-24H	1200	50	400	2,5	3,4	10	3,5	2	80	200	150	350	3,5	250	0,15	0,31	0,7	190
CM50TF-24H	1200	50	400	2,5	3,4	10	3,5	2	80	200	150	350	3,5	250	0,2	0,31	0,7	540
CM75DY-24H	1200	75	600	2,5	3,4	15	5,3	3	150	350	250	350	3,5	250	0,15	0,21	0,47	190
CM75TF-24H	1200	75	600	2,5	3,4	15	5,3	3	150	350	250	350	3,5	250	0,2	0,21	0,47	830
CM100DY-24H	1200	100	780	2,5	3,4	20	7	4	250	350	300	350	3,5	250	0,13	0,16	0,35	270
CM100TF-24H	1200	100	780	2,5	3,4	20	7	4	250	350	300	350	3,5	250	0,2	0,16	0,35	830
CM150DY-24H	1200	150	1100	2,5	3,4	30	10,5	6	250	350	300	350	3,5	250	0,13	0,11	0,24	270
CM200HA-24H	1200	200	1500	2,5	3,4	40	14	8	250	400	300	350	3,5	250	0,04	0,085	0,18	400
CM200DY-24H	1200	200	1500	2,5	3,4	40	14	8	250	400	300	350	3,5	250	0,09	0,085	0,18	400
CM300HA-24H	1200	300	2100	2,5	3,4	60	21	12	250	500	350	350	3,5	250	0,04	0,06	0,12	400
CM300DY-24H	1200	300	2100	2,5	3,4	60	21	12	250	500	350	350	3,5	250	0,07	0,06	0,12	500
CM400HA-24H	1200	400	2800	2,5	3,4	80	28	16	300	500	350	350	3,5	250	0,04	0,045	0,09	400
CM600HA-24H	1200	600	4100	2,7	3,6	120	42	24	300	700	450	350	3,5	250	0,035	0,03	0,06	560
CM1000HA-24H	1200	1000	5800	2,5	3,4	200	70	40	600	1500	1200	350	3,5	250	0,018	0,022	0,05	1600

Примечание. U_{CES} — максимальное напряжение коллектор—эмиттер; I_C — максимальный ток коллектора; P_C — максимальная рассеиваемая мощность; $U_{CE(sat)}$ — напряжение коллектор—эмиттер во включенном состоянии; C_{ies} — входная емкость; C_{oes} — выходная емкость; C_{res} — емкость обратной связи (проходная); $t_{d(on)}$ — время задержки включения, t_r — время нарастания; $t_{d(off)}$ — время задержки выключения; t_f — время спада; U_f — прямое падение напряжения на обратном диоде транзистора; t_{rr} — время восстановления обратного диода при выключении; $R_{th(c-f)}$ — тепловое сопротивление корпус—охладитель; $R_{th(j-c)}$ — тепловое сопротивление переход—корпус.

Таблица 37.16. **Интегральные драйверы управления IGBT**

Тип	Функция	Предельная токовая нагрузка управляющего ключа	Выходные токи, А		Напряжение источников питания, В		Примечание
			I_{31}	I_{32}	максимальное	типовое	
M 57 918 L	Для управления МДП- и IGBT-транзисторами	Один ключ на 50 А с внешними элементами	3	2	28	25	Требуется внешний стабилитрон для отрицательного смещения
M 57 919 L		Три ключа на 30 А	3	2	28	25	
M 57 924 L		Два ключа на 30 А	3	2	28	25	
M 57 956 L		Один ключ на 50 А	3	2	24	15	—
M 57 957 L		Один ключ на 100 А	2	2	18, −12	15, −10	
M 57 958 L		Один ключ на 400 А	5	5	18, −12	15, −10	
M 57 959 L	—	Один ключ на 100 А	2	2	18, −10	15, −7	Имеет защиту IGBT при коротком замыкании
M 57 962 L	—	Один ключ на 200 А	5	5	18, −10	15, −8	—

Примечание. I_{31} — положительный ток в цепи затвора при отпирании IGBT; I_{32} — отрицательный ток в цепи затвора при запирании IGBT.

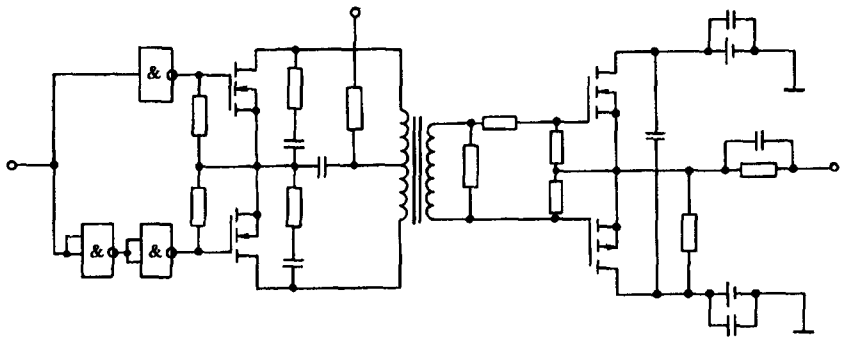


Рис. 37.9. Формирователь импульсов управления индукционным тиристором

стоянии, большую перегрузочную способность по току, высокую помехоустойчивость.

Управление индукционными тиристорами во многом идентично управлению СИТ: нормально включенный прибор переходит в проводящее состояние простым снятием отрицательного напряжения управления, а для ускорения включения подаются сравнительно небольшие токи управления (2÷3 А). Один из вариантов схем формирователей импульсов управления для индукционного тиристора представлен на рис 37 9.

Другим представителем новой технологии тиристоров является полевой тиристор, или МДП-тиристор (MGT). Он был разработан на базе вертикального МДП-транзистора и представляет собой четырехслойную структуру, управляемую n-канальным МДП-транзистором Благодаря входному МДП-транзистору прибор обладает высоким входным сопротивлением, быстрым переключением и может непосредственно управляться от стандартных КМОП-микросхем. Дальнейшее совершенствование технологии и введение в структуру запирающего p-канального МДП-транзистора позволило изготовить полностью управляемый полевой тиристор (MCT). При управляющем напряжении от —15 до —60 В подобные структуры способны обеспечивать запирание анодных токов с плотностью от 2000 до 6000 А/см^2

Типовые схемы драйверов для управления МДП-тиристором MCR1000-4 фирмы MOTOROLA на рабочие токи 25 А и напряжение 1000 В представлены на рис. 37.10.

Наконец, следует отметить новую японскую технологию комбинированного тиристора MCSITh (Sendai). Данный прибор представляет собой монолитную структуру, объединяющую индукционный тиристор и управляющий МДП-транзистор Эквивалентная схема такого тиристора представлена на рис 37 11 Комбинированный тиристор имеет параметры, аналогичные параметрам индукционных тиристоров, однако он более прост в управлении и более динамичен благодаря режиму катодного запирания.

ДРАЙВЕРЫ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Логические сигналы, управляющие силовыми вентилями, могут быть потенциальными или импульсными Потенциальные сигналы необходимы при управлении полевыми транзисторами, IGBT, СИТ. Каждому состоянию ключа должен соответствовать определенный уровень управляющего сигна-

Таблица 37.17. Силовые интеллектуальные модули (IPM)

Схема	U_{CES}, В	I_C, А											
		10	15	20	30 (25)	50	75	100	150	200	300	400	600
Полумостовая схема на IGBT с функцией защиты	1200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	PM400 HSA120	PM600 HSA120
Однофазная мостовая схема на IGBT с функцией защиты	600	—	—	—	—	—	—	—	—	PM20 DSA060	PM300 DSA060	PM400 DSA060	PM600 DSA060
	1200	—	—	—	—	—	PM75 DSA120	PM100 DSA120	PM150 DSA120	PM200 DSA120	PM300 DSA120	—	—
Трехфазная мостовая схема на IGBT с функцией защиты	600	PM10 CSJ060	PM15 CSJ060	PM20 CSJ060	PM30 CSJ060	—	—	PM100 CSA060	PM150 CSA060	PM200 CSA060	—	—	—
	1200	PM10 CZF120	PM15 CZF120	—	—	—	PM75 CSA120	PM10 CSA120	—	—	—	—	—
Трехфазная мостовая схема на IGBT с функцией защиты и элементами контроля состояния схемы	600	—	—	—	PM30 RSF060	PM50 RSK060; PM50 RSA060	PM75 RSA060; PM75 RSK060	PM100 RSA060	PM150 RSA060	PM200 RSA060	—	—	—
	1200	PM10 RSH120	PM15 RSH120	—	PM25 RSB120; PM25 RSK120	PM50 RSA120	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. U_{CES} — максимальное напряжение коллектор—эмиттер силовых ключей модуля; I_C — максимальный ток коллектора силового ключа модуля.

Таблица 37.18. Силовые тиристоры

Тип	I_{TSM}, кА при T_{max}	I_{RRM}, мА, не более	U_{DRM}, В	U_{TM}, В, не более	$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{crit}$, В/мкс	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$, А/мкс	$t_q(t_{rr})$, мкс, не более	Масса, кг
Т112-10; Т112-16	0,15; 0,2	2,5; 3	100÷1800	1,85; 1,8	50÷1000	100	(4,0)	0,007
Т122-20; Т122-25	0,3; 0,35	3	100÷1800	1,75	50÷1000	100	(6,0)	0,012
Т130-40; Т130-50	0,75; 0,8	5; 6	100÷1200	1,75	50÷1000	100	(8,0)	0,013
Т130-63; Т130-80	1,2; 1,35	6	100÷1200	1,65	50÷1000	100	(10,0)	0,026
Т132-40; Т132-50	0,75; 0,8	5; 6	100÷1200	1,75	50÷1000	100	(6,0)	0,027
Т132-16; Т132-25	0,22; 0,33	9	1300÷2000	2,2	50÷1000	100	(6,0)	0,027
Т142-32	0,38	9	1300÷2000	2,1	50÷1000	100	(8,0)	0,053
Т142-40; Т142-50	0,7; 0,75	15	1300÷2000	2,1	50÷1000	100	(8,0)	0,053
Т142-63; Т142-80	1,2; 1,35	3	100÷200	1,65	50÷1000	100	—	0,053
Т152-63; Т152-80	1,1; 1,2	20	1300÷2000	1,95	50÷1000	100	(10)	0,84
Т25; Т50	0,8; 1,5	10; 15	100÷1400	1,9; 1,75	20÷1000	40÷400	30÷250	0,12; 0,19
Т100; Т160	3,0; 3,5	20	100÷1400	1,95; 1,75	20÷1000	40÷400	30÷250	0,44
Т123-200; Т123-250	3,3; 4,5	15	400÷1600	1,9; 1,75	20÷1000	100	500	0,07
Т123-320	5	15	400÷1600	1,65	200÷1000	100	500	0,07
Т133-320	6	35	900÷2000	2,0	200÷1000	100	500	0,2
Т133-400	7	30	400÷1600	1,75	200÷1000	100	500	0,2
Т143-400	8	50	1800÷2400	2,15	200÷1000	100	500	0,28
Т143-500; Т143-630	10; 12	30	400÷1600	1,8; 1,75	200÷1000	100	500	0,28
Т151-100	2,0	15	300÷1600	1,85	20÷1000	80	250	0,18
Т161-125; Т161-160	2,5; 3,3	15	300÷1600	1,75	20÷1000	80	250	0,3
Т171-200; Т171-250	5; 6	30	300÷1600	1,75	20÷1000	80	250	0,51
Т171-320	7	30	300÷1600	1,6	20÷1000	80	250	0,51
Т153-630	14	50	1300÷2400	2,1	20÷1000	80	250	0,55
Т153-800	16	50	1000÷1800	1,9	20÷1000	80	250	0,55
Т253-800	16	70	2000÷2400	2,1	20÷1000	80	250	0,55
Т253-1000	20	70	1000÷1800	1,8	20÷1000	80	250	0,55
Т253-1250	26	70	400÷1200	1,6	20÷1000	80	250	0,55
Т353-800	15	—	2800; 3200	2,3	1600	50	500	0,55
Т173-1250	20	—	3000	2,5	2500	200	300; 400	1,6
Т2-160	3,5	20	400÷1000	1,6	20÷1000	40÷200	70÷250	0,3
Т9-250	5,5	15	400÷1600	1,85	20÷1000	20÷200	70÷250	0,15
Т2-320	8,5	200	400÷1400	2,1	20÷1000	70÷400	250	0,31
Т3-320	6,8	40	1600÷2400	2,3	200÷1000	20÷100	100÷250	0,31
Т500	9,5	20	100÷1600	2,1	20÷1000	70÷400	100÷250	0,31
Т630	13	50	1600÷2400	2,3	200÷1000	40÷200	250	0,345
Т800; Т1000	14; 18	50; 70	1000÷1800	2,1	200÷1000	40÷2000	250	0,345; 0,375
Т2-800	16	70	1800÷2400	2,3	200÷1000	40÷200	250	0,375
ТБ151-50; ТБ151-63	1,0; 1,1	20	500÷1200	2,5; 2,15	200÷1000	400	16÷32	0,18
ТБ161-80; ТБ161-100	2,2; 2,5	30	500÷1200	2,6; 2,15	200÷1000	800	16÷32	0,29
ТБ133-200; ТБ133-250	5,2; 5,5	40	600÷1200	2,4; 2,0	200÷1000	800	20÷40	0,2
ТБ320	6	35	300÷1200	2,8	100÷1000	100÷200	20÷50	0,42
ТБ400	7	35	300÷1000	2,1	100÷1000	100÷200	20÷50	0,42
ТБ143-320; ТБ143-400	6; 7	50	600÷1200	2,5; 2,1	200÷1000	800	25÷50	0,28
ТБ153-630; ТБ153-800	10; 12	70	600÷1200	2,2; 1,8	200÷1000	800	32÷63	0,56
ТБ253-800; ТБ253-1000	20; 21	70	600÷1400	2,25; 1,9	200÷1000	800	32÷63	0,6
ТБ2-160; ТБ3-200	4; 4,5	25	300÷1200	2; 1,7	100÷1000	200÷400	20÷50	0,47
ТБ171-160; ТБ171-200	4; 2,5	40	500÷1200	2; 1,75	200÷1000	800	20÷50	0,51
ТЛ2-160	3,5	20	600÷900	1,9	50÷1000	40÷70	70÷250	0,42
ТЛ-200	4	20	600÷1100	1,6	50÷1000	70	70÷250	0,42
ТЛ-250	4,5	20	400÷1100	1,8	20÷1000	70	70÷250	0,7
ТЛ171-250; ТЛ171-320	6,8; 7,5	35	700÷1100	2,05; 1,65	320÷1000	100	(6,0)	0,51
ТЧ-25; ТЧ-40	0,7; 0,9	20	300÷900	3,05; 1,95	100÷500	100÷200	12÷30	0,12
ТЧ-50; ТЧ-63	1,7; 2	30	300÷900	2,90; 2,35	100÷500	100÷200	12÷30	0,2
ТЧ-80	2,4	28	300÷900	2,6	100÷500	100÷200	12÷30	0,35
ТЧ-100; ТЧ-125	2,8; 3,4	28	300÷1200	2,0; 1,85	100÷500	100÷200	12÷30	0,35
ТЧИ-100	2,4	25	500÷1200	2,0	100÷1000	800	20÷30	0,35

Окончание табл. 37.18

Тип	I_{TSM}, кА при T_{max}	I_{RRM}, мА, не более	U_{DRM}, В	U_{TM}, В, не более	$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{crit}$, В/мкс	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$, А/мкс	$t_q(t_{rr})$, мкс, не более	Масса, кг
ТС2-10; ТС2-16	0,08; 0,1	3	100÷1100	2,0	20÷1000	40÷70	—	0,012
ТС2-25; ТС2-40	0,12; 0,2	3; 4	100÷1100	2,0	20÷1000	40÷70	—	0,012
ТС2-50; ТС2-63	0,23; 0,25	6	100÷1100	2,0	20÷1000	40÷70	—	0,04
ТС2-80	0,33	6	100÷1100	2,0	20÷1000	40÷70	—	0,04
ТС80; ТС125	1,2; 1,5	20	100÷1200	2,3; 1,46	10÷1000	5÷70	70÷250	0,44
ТС-160	1,7	20	100÷1200	1,45	10÷1000	5÷70	70÷250	0,44
ТС161-100; ТС161-125	1,0; 1,5	15	200÷1200	1,45	—	—	—	0,298
ТС161-160; ТС161-200	1,8; 2,3	15	200÷1200	1,75; 1,6	—	—	(15; 20)	0,298
ТС171-250; ТС171-320	3,0; 3,3	15	200÷1200	1,7; 1,5	—	—	(20; 25)	0,510

Примечание. ТБ — быстродействующие тиристоры; ТЛ — лавинные тиристоры; ТЧ — высокочастотные тиристоры; ТС — симметричные тиристоры (снмисторы); I_{TSM} — ударный неповторяющийся прямой ток; I_{RRM} — повторяющийся импульс обратного тока; U_{TM} — импульсное напряжение в открытом состоянии; U_{DRM} — повторяющийся импульс напряжения в закрытом состоянии; $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{crit}$ — критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии; $\left(\frac{di}{dt}\right)_{crit}$ — критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии; t_q — время выключения; t_{rr} — время обратного восстановления.

Таблица 37.19. Мощные двухоперационные тиристоры

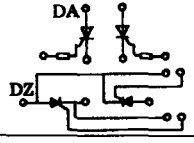
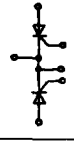
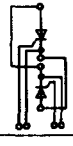
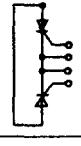
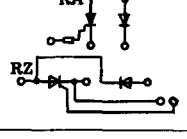
Фирма-изготовитель	Тип прибора	U_{DRM}, В	I_{TQRM}, А	U_T, В	t_{gq}, мкс
Hitachi	GFP600B12	1200	600	2,0	7
	GFP600C16	1600	600	2,5	15
	GFP1000B25	2500	1000	2,5	300
International Rectifier (IR)	160PFT-100, 120	1000; 1200	600	2,7	8
	165PFT-140, 160	1400; 1600	600	3,15	8
	165PFT-100A, 120A	1000; 1200	700	2,7	8
	320PJT-200, 250	2000; 2500	1500	2,8	15
Marconi Electronic Devices	DG304SE	1200	600	2,5	10
	DG386SL	2500	1000	2,5	20
	DG508SD	2500	1400	2,5	25
Mitsubishi Electric	FG1000A	800÷1600	1000	2,2	15
	FG1000AH	2000; 2500	1000	2,5	20
	FG1800AH	2000; 2500	1800	3,0	300
	FG2000AV	4500	2000	3,5	30
Fuji Electric Co	EFT21-45	4500	3000	3,0	25
Toshiba	SG800GXH22	3300; 4500	800	3,5	15
	SG1000EX23	1300÷2500	1000	2,5	18
	SG2000EX22	1300÷2500	2000	2,8	23
	SG2500GXH22	3300; 4500	2500	3,5	25
Westinghouse	CS011245	1200	450	2,5	15
	CS011260	1200	600	2,2	15

Примечание. U_{DRM} — повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии; I_{TQRM} — импульсный повторяющийся запираемый ток; U_T — напряжение в открытом состоянии; t_{gq} — время запирания по управляющему электроду.

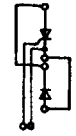
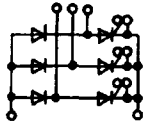
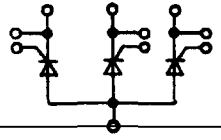
ла. Виды сигналов, их уровни и динамические параметры приводятся в справочной литературе для соответствующих силовых ключей. Импульсные сигналы применяются для управления тиристорами. Сигнал соответствующего уровня и полярности переводит силовой вентиль из одного состояния в другое: положительный импульс отпирает тиристор по анодной цепи, отрицательный переводит его в запертое состояние.

Для того чтобы логический сигнал в системе управления мог использоваться для отпирания или запирания силовых структур, необходимо решить, по крайней мере, три задачи: 1) сформировать сигнал, несущий информацию о необходимом воздействии

Таблица 37.20. Силовые диодно-тиристорные модули

Схема	U_{RRM}, В	I_{TAV}, А							
		20	25	55	90	130	150	200	400
	400	—	—	—	—	—	—	—	TM400HA-M
	800	—	—	—	—	—	—	—	TM400HA-H
	1200	—	—	—	—	—	—	—	TM400HA-24
	1600	—	—	—	—	—	—	—	TM400HA-2H
	400	TM20DA-M	TM25DZ-M	TM55DZ-M	TM90DZ-M	TM130DZ-M	—	TM200DZ-M	TM400DZ-M
	800	TM20DA-H	TM25DZ-H	TM55DZ-H	TM90DZ-H	TM130DZ-H	—	TM200DZ-H	TM400DZ-H
	1200	—	TM25DZ-24	TM55DZ-24	TM90DZ-24	TM130DZ-24	—	TM200DZ-24	TM400DZ-24
	1600	—	TM25DZ-2H	TM55DZ-2H	TM90DZ-2H	TM130DZ-2H	—	TM200DZ-2H	TM400DZ-2H
	400	—	TM25CZ-M	TM55CZ-M	TM90CZ-M	TM130CZ-M	—	TM200CZ-M	TM400CZ-M
	800	—	TM25CZ-H	TM55CZ-H	TM90CZ-H	TM130CZ-H	—	TM200CZ-H	TM400CZ-H
	1200	—	TM25CZ-24	TM55CZ-24	TM90CZ-24	TM130CZ-24	—	TM200CZ-24	TM400CZ-24
	1600	—	TM25CZ-2H	TM55CZ-2H	TM90CZ-2H	TM130CZ-2H	—	TM200CZ-2H	TM400CZ-2H
	400	—	—	—	—	TM130PZ-M	—	TM200PZ-M	TM400PZ-M
	800	—	—	—	—	TM130PZ-H	—	TM200PZ-H	TM400PZ-H
	1200	—	—	—	—	TM130PZ-24	—	TM200PZ-24	TM400PZ-24
	1600	—	—	—	—	TM130PZ-2H	—	TM200PZ-2H	TM400PZ-2H
	400	—	—	—	—	—	—	—	TM400UZ-M
	800	—	—	—	—	—	—	—	TM400UZ-H
	1200	—	—	—	—	—	—	—	TM400UZ-24
	1600	—	—	—	—	—	—	—	TM400UZ-2H
	400	TM20RA-M	TM25RZ-M	TM55RZ-M	TM90RZ-M	TM130RZ-M	—	TM200RZ-M	—
	800	TM20RA-H	TM25RZ-H	TM55RZ-H	TM90RZ-H	TM130RZ-H	—	TM200RZ-H	—
	1200	—	TM25RZ-24	TM55RZ-24	TM90RZ-24	TM130RZ-24	—	TM200RZ-24	—
	1600	—	TM25RZ-2H	TM55RZ-2H	TM90RZ-2H	TM130RZ-2H	—	TM200RZ-2H	—

Окончание табл. 37.20

Схема	U_{RRM}, В	I_{TAV}, А							
		20	25	55	90	130	150	200	400
	400	—	TM25EZ-M	TM55EZ-M	TM90EZ-M	TM130EZ-M	—	TM200EZ-M	—
	800	—	TM25EZ-H	TM55EZ-H	TM90EZ-H	TM130EZ-H	—	TM200EZ-H	—
	1200	—	TM25EZ-24	TM55EZ-24	TM90EZ-24	TM130EZ-24	—	TM200EZ-24	—
	1600	—	TM25EZ-2H	TM55EZ-2H	TM90EZ-2H	TM130EZ-2H	—	TM200EZ-2H	—
	400	—	—	—	—	TM130GZ-M	—	TM200GZ-M	—
	800	—	—	—	—	TM130GZ-H	—	TM200GZ-H	—
	1200	—	—	—	—	TM130GZ-24	—	TM200GZ-24	—
	1600	—	—	—	—	TM130GZ-2H	—	TM200GZ-2H	—
	400	TM10T3B-M	TM15T3A-M	TM25T3A-M	—	—	—	—	—
	800	TM10T3B-H	TM15T3A-H	TM25T3A-H	—	—	—	—	—
	300	—	—	TM60SA-6	TM90SA-6	—	TM150SA-6	—	—
	400	—	—	TM60SZ-M	TM100SZ-M	—	—	—	—

Примечание. U_{RRM} — повторяющийся импульс обратного напряжения; I_{TAV} — средний ток в открытом состоянии.

Таблица 37.21. Статические индукционные тиристоры

Фирма-изготовитель	Тип прибора	U_{DRM}, В	I_{TAV}, А	I_{TRM}, А	U_T, В	$t_{вкл}$, мкс	$t_{выкл}$, мкс
Mitsubishi	TS1600B-20	2000	600	1000	3,2	2,0	3,2
IXYS	IXGH40-60A	600	50	—	1,8	0,1	0,1
Toyota	TS1602H-12	1200	600	800	2,7	2,0	2,0

Примечание. U_{DRM} — повторяющийся импульс напряжения в закрытом состоянии; I_{TAV} — средний ток в открытом состоянии; I_{TRM} — импульсный ток в открытом состоянии; U_T — напряжение в открытом состоянии; $t_{вкл}$ — время включения; $t_{выкл}$ — время выключения.

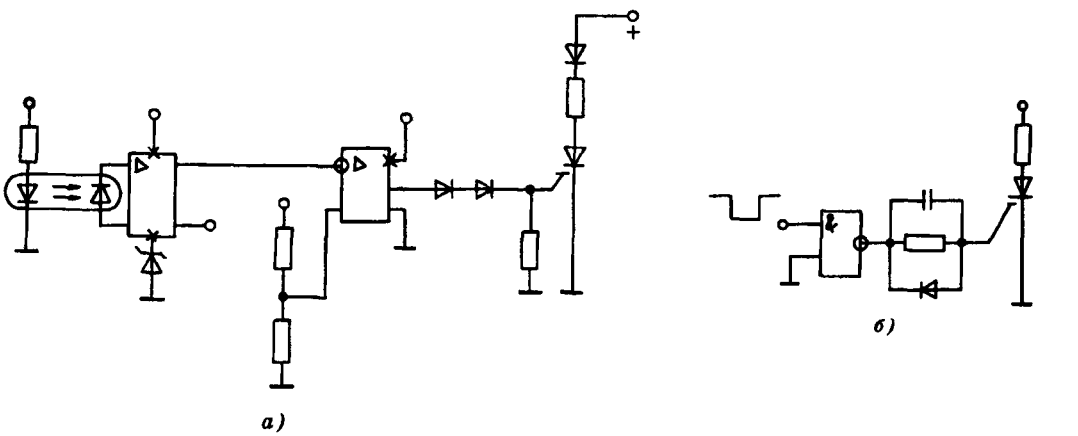


Рис. 37.10. Драйверы управления полевым тиристором с оптопарой (*а*) и с запуском от микросхемы (*б*)

на силовую структуру в заданный момент времени; 2) передать эту информацию на уровень потенциала управляющего электрода силового вентиля; 3) обеспечить достаточный уровень мощности для воздействия на вентиль.

Хорошо известны способы решения первой задачи. Микропроцессорные контроллеры успешно формируют логические сигналы любого вида по заданным алгоритмам управления. Решение второй задачи требует потенциальной развязки источника и приемника информации. Из известных способов потенциальной развязки в последние годы получили распространение оптопары, обладающие хорошими частотными свойствами, но весьма низким коэффициентом передачи энергии сигнала. Поэтому принятый оптроном сигнал должен быть усилен, причем источник питания усилителя должеи быть потенциально связан с управляющим электродом силового вентиля. Функциональный узел, сочетающий функции элемента потенциальной развязки и усиления мощности сигнала управления иа требуемом потенциальном уровне, называют драйвером. Таким образом, управление силовыми ключами требует значительных аппаратных затрат в виде драйверов и автономных изолированных источников питаиия.

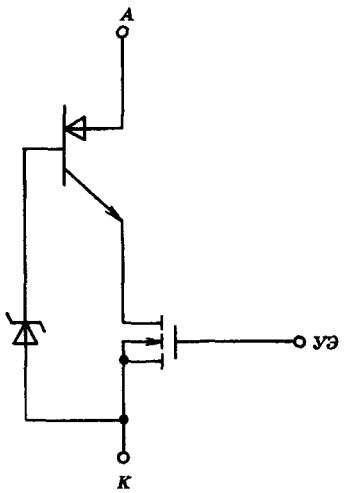


Рис. 37.11. Комбинированный тиристор:
А — аиод; *К* — катод; *УЭ* — управляемый электрод

37.3. ВЫПРЯМИТЕЛИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ВЕНТИЛЯМИ И ТРАНСФОРМАТОРАМИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные показатели работы выпрямителя:

1. Внешняя характеристика — зависимость выпрямленного (выходного) напряжения от тока иагрузки. $U_d = f(I_d)$. Наклон внешней характеристики для реальных выпрямителей определяется внутренними сопротивлеииями выпрямительных элементов — вентилей и обмоток трансформатора, а также зависит от характера нагрузки (индуктивная, емкостная, противоЭДС) и длительиости процесса перехода тока с одного вентиля на другой (коммутация тока).

2. *Коэффициент использования преобразовательного трансформатора* $C_{тр} = S_{тр}/P_d$ — отношение расчетной мощности трансформатора, определяющей его габариты, к мощности постоянной составляющей на выходе выпрямителя. Здесь $S_{тр} = (S_1+S_2)/2$; $S_1 = U_1 I_1$; $S_2 = \sum U_2 I_2$.

3. *Коэффициент мощности* $\chi = P/S$ — отношение активной мощности, потребляемой от сети переменного тока, к полной кажущейся мощности.

4. *Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения* $q = U_n/U_d$ — отношение амплитуды n-й гармоники (обычно наиболее низкочастотной) в кривой выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения.

Расчет выпрямителя в большинстве случаев проводится из условий обеспечения заданных напряжений U_d и тока I_d. Задаются напряжение и частота питающей сети U_1 и f. Расчет сводится к определению токов и напряжений, необходимых для выбора типа и числа вентилей, а также для электрического расчета трансформатора (числа витков обмоток и размеров магнитопровода).

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения используют сглаживающие фильтры. Выбор типа фильтра определяется характером нагрузки, диапазоном изменения тока нагрузки, а также типом вентилей. Для маломощных выпрямителей с вентилями и трансформатором, имеющими относительно большое внутреннее сопротивление, обычно применяются фильтры с емкостным входом; мощные выпрямители работают с индуктивными или резонансными фильтрами. При расчете выпрямителей, имеющих на выходе фильтр, необходимо учитывать влияние последнего на процессы в выпрямителе (форма тока и длительность его протекания в цепях вентилей и обмоток трансформатора, пульсации выходного напряжения).

Все выпрямители (кроме однофазных двухполупериодных при чисто активной нагрузке) потребляют из сети несинусоидальный ток. В кривой тока, потребляемого m-фазным выпрямителем, имеются высшие гармоники с частотами $f_2 = (km \pm 1) f_c$, где f_c — частота сети; $k = 1, 2, 3...$

Например, $f_2/f_c = 2, 4, 5, 7...$ при $m = 3$ и $f_2/f_c = 5, 7, 11, 13...$ при $m = 6$.

ОДНОФАЗНАЯ ОДНОПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Ток в вентиле, нагрузке и вторичной обмотке трансформатора ($i_a = I_d = i_2$) однонаправленный (рис. 37.12, *а*). В первичной цепи ток переменный, его рабочая составляющая (без учета намагничивающего тока трансформатора) $i_1 = (i_2 - I_d)/n_{тр}$:

$$I_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_1^2 d\vartheta} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} (i_2 - I_d)^2 d\vartheta}/n_{тр} = 1{,}21 I_d/n_{тр}.$$

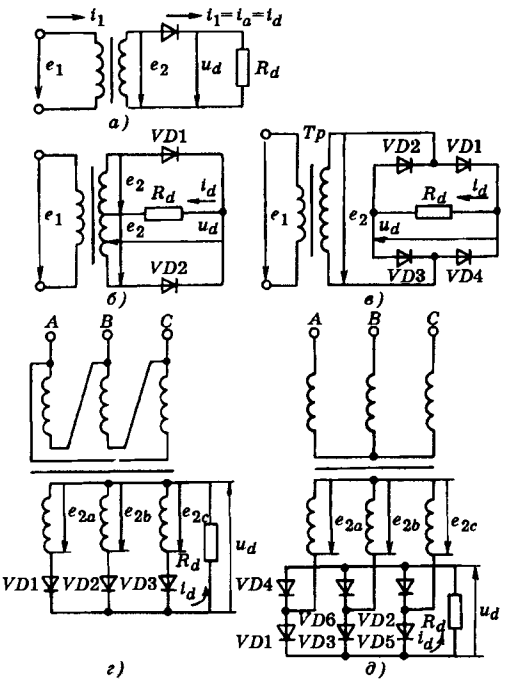


Рис. 37.12. Схемы выпрямителей

а — однофазная однополупериодная; *б* — однофазная нулевая; *в* — однофазная мостовая; *г* — трехфазная нулевая; *д* — трехфазная мостовая; R_d — расчетное сопротивление нагрузки выпрямителя, $R_d = U_d/I_d$

Здесь i_1, i_2 — мгновенные значения токов; $n_{тр}$ — коэффициент трансформации; $\vartheta = \omega t$ — время, рад.

Магнитная система трансформатора подмагничивается постоянной составляющей вторичного тока. Соотношения, приведенные в табл. 37.22, показывают, что расчетная мощность трансформатора в этой схеме велика. Схема применяется для маломощных выпрямителей с емкостными фильтрами.

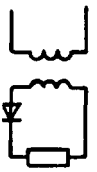
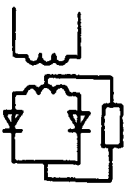
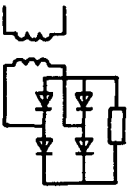
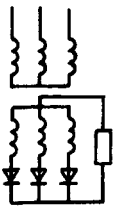
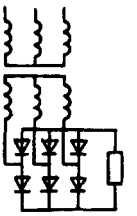
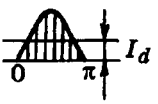
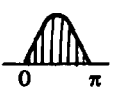
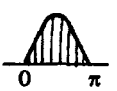
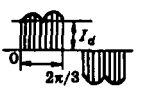
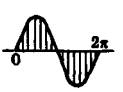
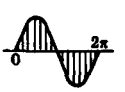
СХЕМЫ ОДНОФАЗНЫХ ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

В двухполупериодных схемах (рис. 37.12, *б*, *в*) через нагрузку ток протекает в течение обоих полупериодов переменного напряжения. В схеме (рис. 37.12, *б*) выведена средняя точка вторичной обмотки трансформатора, а вентили анодами (или катодами) присоединяются к концам обмотки (нулевая схема). В схеме другого типа (рис. 37.12, *в*) вентили собираются в мост (мостовая схема). В двухполупериодных схемах отсутствует поток подмагничивания магнитопровода трансформатора.

СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Здесь также применяются два типа схем: схемы с выводом нулевой точки (рис. 37.12, *г*) вентильных

Таблица 37.22. Схемы выпрямления и расчетные формулы при чисто активной нагрузке, идеальных вентилях и трансформаторах

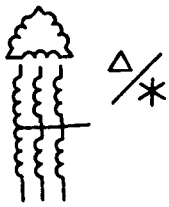
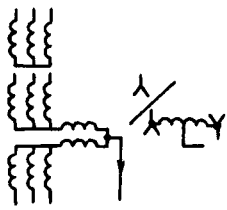
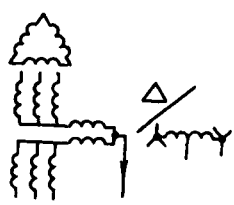
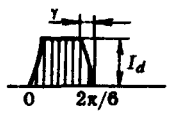
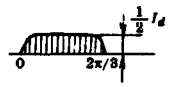
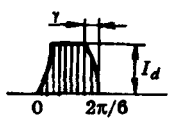
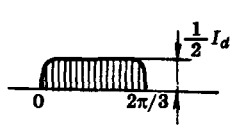
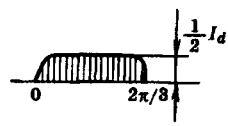
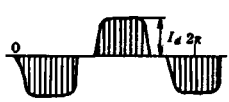
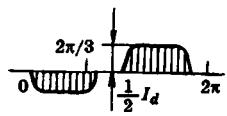
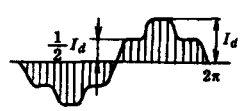
Схема						
Форма кривой i_d						
m		1	2	2	3	6
U_d/U_2		0,45	0,9	0,9	1,17	2,34
$U_{обр\ max}/U_d$		3,14	3,14	1,57	2,09	1,045
Форма кривой i_2						
I_a/I_d		1	0,5	0,5	0,33	0,33
$I_{a\ max}/I_d$		3,14	1,57	1,57	1,21	1,045
Форма кривой i_1						
I_2/I_d		1,57	0,785	1,11	0,577	0,815
$I_1w_1/(I_dw_2)$		1,21	1,11	1,11	0,471	0,816
S_1/P_d		2,69	1,23	1,23	1,21	1,045
S_2/P_d		3,49	1,74	1,23	1,48	1,045
$S_{тр}/P_d$		3,09	1,48	1,23	1,345	1,045
U_{nm}/U_d	$k=1$	1,57	0,663	0,663	0,250	0,057
	$k=2$	0,633	0,133	0,133	0,057	0,014
$n=km$	$k=3$	0,55	0,057	0,057	0,025	0,006

Примечание. U_d, I_d — средние напряжение и ток выпрямителя; $I_a, I_{a\ max}$ — средний и максимальный анодный ток; I_1, I_2 — действующие первичный и вторичный токи.

обмоток трансформатора (нулевые схемы) и мостовые схемы (рис. 37.12, *д*). В нулевой схеме, когда вентили соединены вместе катодами, а анодами присоединены к обмоткам трансформатора, в любой момент времени проводит ток тот вентиль, потенциал анода которого наиболее высок по отношению к нулевой точке вентильных обмоток. В мостовой схеме во внекоммутационный период ток проводят одновременно два вентиля: один из катодной группы, другой из анодной. При этом из катодной группы (*VD1*, *VD3*, *VD5*) проводит тот вентиль, потенциал анода которого наиболее низок, а из анодной группы (*VD2*, *VD4*, *VD6*) тот, потенциал катода которого наиболее отрицателен. В нулевой схеме кривая напряжения на нагрузке формируется из отрезков синусоид фазных напряжений.

Нулевая схема с точки зрения частоты и пульсации выпрямленного напряжения обеспечивает режим трехфазного выпрямителя ($m = 3$), а мостовая — шестифазного выпрямителя ($m = m_{экв} = 6$).

Таблица 37.23. Схемы выпрямления и расчетные формулы при $X_d = \infty$, идеальных вентилях и реальных трансформаторах

Схема и векториая диаграмма			
m	6	6	6
U_{d0}/U_2	1,35	1,17	1,17
$U_{обр\ max}/U_{d0}$	2,35	2,09	2,09
Форма кривой i_a			
I_a/I_d	0,167	0,167	0,167
Форма кривой i_2			
I_2/I_d	0,458	0,289	0,289
Форма кривой i_1			

Хотя нулевая схема имеет в 2 раза меньшее число вентилей, чем мостовая, она имеет ряд недостатков по сравнению с мостовой:

1) наличие в магнитопроводе трансформатора постоянного потока вынужденного подмагничивания, в результате чего резко увеличивается намагничивающий ток;

2) отношение максимального значения обратного напряжения на вентилях к среднему значению выпрямленного напряжения в 2 раза больше;

3) отношеиие расчетной мощности траисформатора к мощности в нагрузке больше (как видно из табл. 37.23) примерно на 30%;

4) коэффициент пульсаций выпрямлениого напряжения выше (более чем в 4 раза), что требует использования более громоздких фильтров.

Поэтому трехфазная нулевая схема используется лишь в простых выпрямителях средней мощности при невысоком напряжении.

37.4. ПУЛЬСАЦИИ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Напряжение на выходе выпрямителя u_d (рис. 37.13) имеет пульсации. Порядок гармонических составляющих n кратен числу фаз выпрямления m: $n = k_r m$, где $k = 1, 2, 3...$ — кратность гармоник.

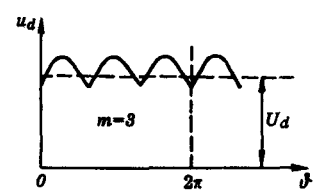


Рис. 37.13. Пульсации в кривой выпрямленного напряжения

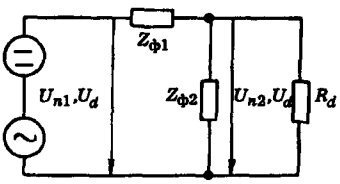


Рис. 37.14. Структурная схема сглаживающего фильтра U_{n1}, U_{n2} — напряжения n-й гармоники на входе и выходе фильтра

Амплитуды составляющих U_d определяются разложением кривой u_d в ряд Фурье. При идеальных вентилях и трансформаторе и непрерывной кривой выпрямленного тока (на входе фильтра индуктивность) $U_n = 2U_d/(n^2-1)$ (эта формула не относится к случаю, когда $m = 1$).

Следовательно, коэффициент пульсаций для гармоники порядка n

$$q = \frac{U_n}{U_d} = \frac{2}{n^2-1}.$$

При фазовом регулировании выпрямленного напряжения, когда включение каждого вентиля задерживается на угол α, коэффициент пульсаций

$$q = \frac{2}{n^2-1}\sqrt{1+n^2\operatorname{tg}^2\alpha}.$$

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и тока применяются фильтры. Расчет сглаживающих фильтров производят с учетом гармонических порядка $n = m$, т.е. при $k_г = 1$. Как показано на эквивалентной схеме Г-образного фильтра (рис. 37.14), в кривой напряжения u_d можно выделить постоянную составляющую, которая не должна ослабляться фильтром, и переменную составляющую, которая должна замыкаться в контуре $Z_{ф1}$ и $Z_{ф2}$. На сопротивлении $Z_{ф1}$ имеет место падение напряжения от переменной составляющей тока. Для переменной составляющей тока сопротивление параллельной ветви фильтра $Z_{ф2}$ должно быть много меньше сопротивления цепи нагрузки, а сопротивление звена $Z_{ф1}$ должно быть много больше сопротивления нагрузки.

Заданными величинами при расчете фильтра являются коэффициенты пульсаций на входе $q_{вх}$ и на выходе $q_{вых}$ ($q_{вых}$ задается потребителем).

Коэффициент сглаживания фильтра

$$s = \frac{q_{вх}}{q_{вых}} = \frac{U_{n\,вх}U_{d\,вых}}{U_{d\,вх}U_{n\,вых}}.$$

При $U_{d\,вых} \approx U_{d\,вх}$

$$s = \frac{U_{n\,вх}}{U_{n\,вых}} = \left|\frac{\underline{Z}_{ф1}+\underline{Z}_{ф2}}{\underline{Z}_{ф2}}\right|.$$

Простой индуктивный фильтр (рис. 37.15, *а*) используется главным образом в мощных выпрямителях. Такой фильтр, как и Г-образный фильтр с индуктивным входом при $m \geq 2$, сглаживает выходной ток выпрямителя, в связи с чем токи вентилей в обмотках трансформатора приобретают прямоугольную форму (что, в частности, сказывается на расчетных показателях выпрямителя).

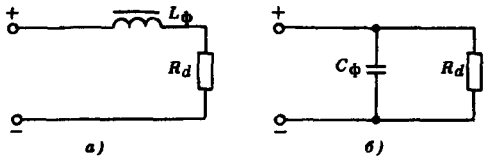


Рис. 37.15. Схемы простых сглаживающих фильтров
***а* — индуктивный фильтр; *б* — емкостный фильтр**

Амплитудное значение тока n-й гармоники, протекающего через $L_ф$ и R_d

$$I_n = \frac{U_n}{\sqrt{R_d^2+(n\omega L_ф)^2}}.$$

Следовательно, коэффициент сглаживания

$$s = \frac{\sqrt{(n\omega L_ф)^2+R_d^2}}{R_d} \approx \frac{n\omega L_ф}{R_d},$$

откуда требуемая индуктивность сглаживающего реактора $L_ф = sR_d/n\omega$.

В магнитопроводе реактора необходимо предусмотреть воздушный зазор для устранения возможного насыщения за счет протекания через обмотку постоянной составляющей тока нагрузки.

Простой емкостный фильтр (рис. 37.15, *б*) используется главным образом при относительно малых токах. Этот фильтр применяется чаще всего на выходе однополупериодной или двухполупериодной схемы выпрямления. Такой фильтр сильно изменяет режим работы выпрямителя, так как вентили включаются лишь на весьма короткое время, когда напряжение вторичной обмотки трансформатора превышает пульсирующее напряжение на конденсаторе.

Требуемая емкость фильтра при заданном коэффициенте пульсаций q:

для однополупериодной схемы выпрямления

$$C_ф \geq \frac{2}{q\omega R_d};$$

для двухполупериодной схемы выпрямления

$$C_ф \geq \frac{1}{2q\omega R_d}.$$

Коэффициент пульсации q выбирается обычно в диапазоне 0,01÷0,1.

Для получения лучшего сглаживания выходного напряжения после емкостного фильтра подсоединяют еще Г-образное звено LC (рис. 37.16). Получающийся П-образный фильтр состоит из двух звеньев: звена C_1 и Г-образного звена $L_ф C_2$. Для фильтра $L_ф C_2$, приняв $U_{d1} = U_{d2}$, можно записать

$$s_{LC} = \left|\frac{jn\omega L_ф + 1/jn\omega C_2}{1/jn\omega C_2}\right| = n^2\omega^2 L_ф C_2 - 1.$$

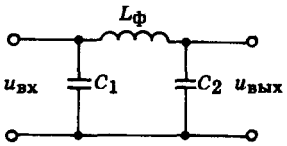


Рис. 37.16. Схема сложного сглаживающего фильтра

37.5. СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При увеличении мощности выпрямительных установок свыше нескольких киловатт используются схемы, питающиеся от трехфазной сети переменного тока и обеспечивающие режим трехфазного ($m = 3$) или шестифазного ($m = 6$) выпрямления.

Увеличение числа фаз выпрямления при переходе к трехфазной сети переменного тока обеспечивает:

1) равномерную загрузку током фаз питающей сети;

2) уменьшение относительной нагрузки вентилей выпрямителя по току (относительно тока нагрузки);

3) лучшую форму кривой тока, потребляемого от сети;

4) снижение пульсаций выпрямленного тока и напряжения и увеличение их частоты.

Выпрямители средней и большой мощности обычно имеют в цепи нагрузки достаточное индуктивное сопротивление $X_d = 2\pi f L_d$, поэтому расчетные соотношения для них обычно приводятся для случая $X_d/R_d = \infty$ (табл. 37.23).

В любой схеме выпрямления (кроме выпрямителей с емкостным фильтром и схем с умножением напряжения) кривая выпрямленного напряжения формируется из отрезков синусоидального напряжения e_2 вентильных обмоток трансформатора. Какая часть кривой e_2 входит в состав выпрямленного напряжения u_d, зависит от числа фаз выпрямления m. Поэтому среднее значение напряжения на выходе m-фазного выпрямителя U_{d0} при холостом ходе ($I_d \approx 0$) и при отсутствии регулирования ($\alpha = 0$) (рис. 37.17, *а*) зависит от m:

$$U_{d0} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} \sqrt{2}\, E_2 \cos\vartheta\, d\vartheta = \sqrt{2}\, E_2 \frac{\sin \pi/m}{\pi/m},$$

где E_2 — действующее значение фазного напряжения; $\vartheta = \omega t$.

В трехфазной мостовой схеме на нагрузке действует напряжение, состоящее из линейных напряжений. Поэтому в выражение для U_{d0} вместо E_2 надо подставить $\sqrt{3}\, E_2$ и брать $m = 6$, тогда $U_{d0} = 2{,}34E_2$.

На режим работы выпрямителей средней и большой мощности оказывают существенное влияние анодные индуктивные сопротивления $X_a = 2\pi f L_a$, которые в эквивалентной схеме выпрямителя оказываются включенными последовательно с вентильными обмотками трансформатора. Эти сопротивления определяются главным образом индуктивностями рассеяния обмоток трансформатора и индуктивностью питающей сети переменного тока. Наличие анодных индуктивностей приводит к затяжке процессов переключения (коммутации) тока с вентилей одной фазы на вентили другой фазы. В течение интервала коммутации γ ток одновременно проводят вентили двух фаз, участвующих в коммутации. Следовательно, длительность протекания тока λ_a через вентиль возрастает:

$$\lambda_a = (2\pi/m) + \gamma.$$

На интервале коммутации напряжение u_d на выходе выпрямителя определяется как полусумма напряжений фаз, участвующих в коммутации:

$$u_d = \frac{e_{2a} + e_{2b}}{2}.$$

Вследствие этого в кривой выпрямленного напряжения u_d появляются "вырезки" (рис. 37.17, *б*), и среднее значение напряжения на нагрузке $U_{d\gamma}$ оказывается меньше, чем при холостом ходе U_{d0}.

Снижение выпрямленного напряжения $\Delta U_{d\gamma}$ из-за коммутационных потерь тем больше, чем больше m, X_a и I_d.

Это объясняется тем, что с ростом как X_a, так и I_d длительность процесса коммутации γ увеличивается:

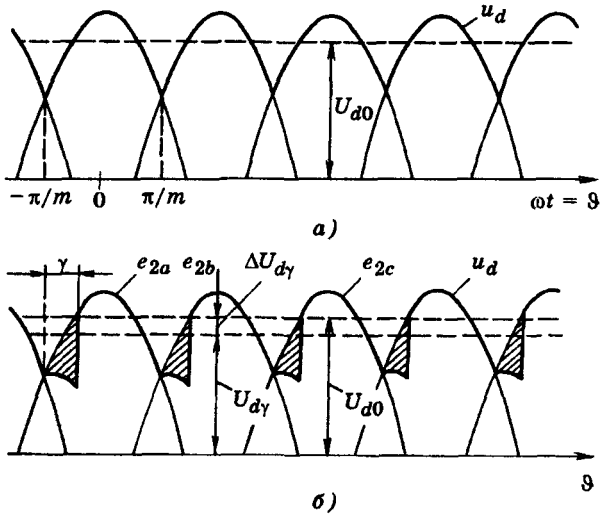


Рис. 37.17. Временные диаграммы выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя ($\alpha = 0$) при мгновенной коммутации $\gamma = 0$ (*а*) и при $\gamma \neq 0$ (*б*)

$$\gamma = \arccos\left[1 - \frac{I_d X_a}{\sqrt{2}\, E_2 \sin \pi/m}\right],$$

и площадь "вырезок" в кривой U_d возрастает.

Зависимость среднего значения выпрямленного напряжеиия U_d от тока I_d нагрузки называется внешней (нагрузочной) характеристикой выпрямителя (рис. 37.18, линия *1*):

$$U_{d\gamma} = U_{d0} - \Delta U_{d\gamma} = U_{d0} - \frac{mX_a}{2\pi} I_d .$$

Если в последнюю формулу ввести относительное напряжение короткого замыкания трансформатора $u_к\%$, %, то при номинальном токе $I_d = I_{d\,ном}$ относительное снижение напряжения, %

$$\Delta U_{d\gamma} = \frac{\Delta U_{d\gamma}}{U_{d0}} = A u_к,$$

где A — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления.

Внешняя характеристика выпрямителя строится обычно в относительных единицах

$$U_{d\gamma *} = 1 - \frac{A u_к\%}{100} I_{d*},$$

где $U_{d\gamma *} = U_{d\gamma}/U_{d0}$; $I_{d*} = I_d/I_{d\,ном}$.

Схема с уравнительным реактором (2-я или 3-я графа табл. 37.23) при малых токах ($I_d < I_{d\,кр}$) работает как шестифазная нулевая схема с резко падающей внешней характеристикой (пунктир на рис. 37.18) и напряжением холостого хода $U_{d0} = 1{,}35E_2$. Когда обе трехфазные нулевые группы начинают работать параллельно (это имеет место при $I_d > I_{d\,кр}$), то наклон характеристики уменьшается, причем условное напряжение холостого хода $U'_{d0} = 1{,}17E_2$.

Ток через вентиль (среднее значение) в m-фазной нулевой схеме при большой индуктивности цепи нагрузки имеет форму прямоугольника (при $\gamma = 0$) длительностью $\lambda_a = 2\pi/m$, поэтому

$$I_a = I_d/m;$$

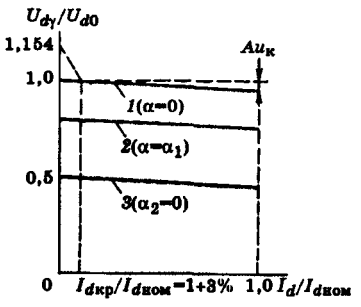


Рис. 37.18. Внешние характеристики выпрямителей (в относительных единицах)

1 — при $\alpha = 0$ (неуправляемый выпрямитель); 2 и 3 — при $\alpha \neq 0$

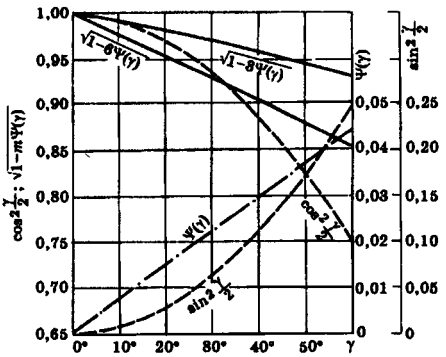


Рис. 37.19. Зависимость коммутационной фуикции от угла управлеиия α

здесь для трехфазной мостовой схемы надо брать $m = 3$.

Действующее значение тока в фазе вентильной обмотки преобразовательного трансформатора с учетом коммутации

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m\Psi(\gamma)},$$

где $\sqrt{1 - m\Psi(\gamma)}$ — функция, учитывающая влияние угла коммутации на действующее значеиие тока коммутации (рис. 37.19).

Действующее значение первичного тока с учетом коммутации

$$I_1 = I_1(\gamma = 0) \sqrt{1 - 2m \sin^2 \frac{\pi}{m} \Psi(\gamma)}.$$

Расчетные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора в общем случае

$$S_1 = m_1 I_1 U_1; \quad S_2 = m_2 I_2 U_2.$$

Типовая (расчетная) мощность трансформатора

$$S_{тр} = \frac{S_1 + S_2}{2}.$$

Значения $S_{тр}$ для различных схем и $\gamma = 0$ приведены в табл. 37.22 и 37.23.

РАБОТА ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА АКТИВНО-ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Линейные диаграммы напряжения при фазовом регулировании напряжения трехфазного нулевого выпрямителя, осуществляемом путем выведения угла управления α, показаны на рис. 37.20 для случая, когда нагрузка имеет индуктивный характер. При непрерывном выпрямленном токе и при $\gamma = 0$ среднее значение напряжения

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\pi/m+\alpha}^{+\pi/m+\alpha} \sqrt{2}\, E_2 \cos \vartheta\, d\vartheta = U_{d0} \cos\alpha.$$

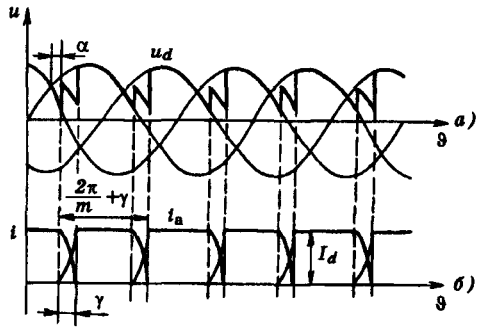


Рис. 37.20. Временные диаграммы напряжения на нагрузке (*а*) и токов вентилей (*б*) с учетом процесса коммутации

Зависимость $U_{d\alpha} = f(\alpha)$ (регулировочная характеристика) для любого m при достаточно большой индуктивности в цепи нагрузки $(X_d/R_d) >> 1$, построенная по этому соотношению, показана на рис. 37.21 (кривая, обозначенная $m = \infty$).

При $X_d = 0$ (чисто активная нагрузка) в кривой выпрямленного тока при $\alpha > \alpha_{кр} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$ появляются разрывы. Так как при $X_d \neq 0$ в кривой выпрямленного напряжения при $\alpha > \alpha_{кр}$ имеются отрицательные площадки, а при $X_d = 0$ их нет, регулировочные характеристики в последнем случае на участке $\alpha > \alpha_{кр}$ идут выше (рис. 37.21). При $m \to \infty$ $\alpha_{кр} \to \pi/2$ и регулировочная характеристика для случая чисто активной нагрузки такого выпрямителя совпадает с характеристикой для конечного числа $m > 2$ и $X_d/R_d = \infty$.

При чисто активной нагрузке в режиме разрывных токов I_d (т.е. при $\alpha > \alpha_{кр}$) регулировочная характеристика определяется выражением

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \frac{1 - \sin(\alpha - \pi/m)}{2 \sin \pi/m}$$

и диапазон изменения угла α, необходимый для изменения выпрямленного напряжения U_d во всем диапазоне от 0 до U_{d0}, зависит от числа фаз выпрямления m $0 \leq \alpha \leq \pi/2 + \pi/m$.

При конечном значении X_d/R_d $(0 < X_d/R_d < \infty)$ режим разрывного тока наступает при $\alpha_{кр1} > \alpha_{кр}$ и регулировочная характеристика при $0 < \alpha < \alpha_{кр}$ идет по косинусоиде, соответствующей режиму непрерывного тока, а при $\alpha > \alpha_{кр1}$ она идет выше (штриховая линия на рис. 37.21, построенная для случая $m = 3$).

В управляемом выпрямителе длительность процесса коммутации зависит от угла управления α:

$$\gamma = \arccos\left[\cos\alpha - \frac{I_d X_a}{\sqrt{2}\, E_2 \sin \pi/m}\right] - \alpha.$$

Внешняя характеристика управляемого выпрямителя при режиме непрерывного тока определяется выражением (см. линии *2* и *3* на рис. 37.18)

$$u_{d\alpha\gamma} = U_{d0}\cos\alpha - \frac{mX_a}{2\pi} I_d$$

или в относительных единицах:

$$\frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} = \cos\alpha - \frac{Au_{к\%}}{100} \frac{I_d}{I_{d\,ном}}.$$

РАБОТА ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА ПРОТИВОЭДС

При наличии в цепи нагрузки выпрямителей противоЭДС E_d (якорь двигателя постоянного тока, аккумуляторная батарея, электролизная или гальваническая ванна) пульсации выпрямленного тока увеличиваются. Когда амплитуда пульсаций тока становится равной среднему значению I_d, выпрямитель переходит в режим разрывного тока. Критический угол управления $\alpha_{кр}$, определяющий переход в такой режим, при $E_d \neq 0$ меньше угла $\alpha_{кр1}$, определенного при $E_d \neq 0$ и конечном значении X_d/R_d.

При работе в режиме разрывного тока (рис. 37.22, *а*) внешняя характеристика идет круче, чем при непрерывном токе (рис. 37.22, *б*), что объясняется уменьшением отрицательных площадок в кривой U_d (рис. 37.22, *а*) по мере снижения I_d. Из-за резкого подъема U_d при $I_d < I_{d\,кр}$ такой режим обычно нежелателен; для его устранения надо либо увеличить индуктивность X_d в цепи постоянного тока, либо ограничивать угол α достаточно небольшими значениями.

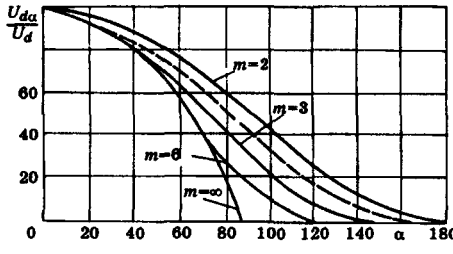


Рис. 37.21. Регулировочные характеристики управляемых выпрямителей при различных m

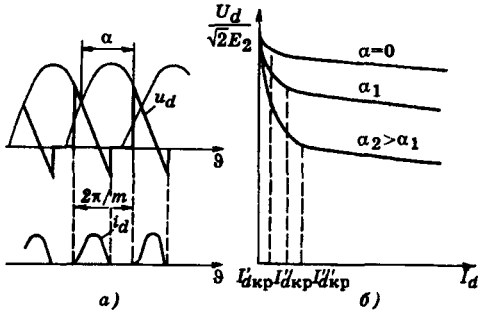


Рис. 37.22. Режим разрывного тока управляемого выпрямителя

37.6. ВЕДОМЫЕ СЕТЬЮ (ЗАВИСИМЫЕ) ИНВЕРТОРЫ

Инвертированием называется процесс преобразования постоянного тока в переменный, т.е. процесс, обратный выпрямлению.

Перевод преобразователя из выпрямительного режима в инверторный осуществляется путем изменения полярности постоянного напряжения при сохранении направления постоянного тока. В инверторах, ведомых сетью, коммутация тока вентиля одной фазы на вентиль другой фазы обеспечивается, как и в выпрямителях, напряжением источника переменной ЭДС приемной сети.

Нулевая схема однофазного двухполупериодного инвертора, ведомого сетью, приведена на рис. 37.23.

Для осуществления инверторного режима необходимо, чтобы ток и ЭДС в сетевой обмотке w_1 имели на большей части периода одинаковое направление, что означает отдачу энергии в сеть переменного тока. Для выполнения этого условия вентили должны пропускать ток преимущественно при отрицательной полуволне переменной ЭДС в вентильных полуобмотках w_2 и w'_2 инверторного трансформатора. При этом протекание тока через вентиль происходит под действием разности напряжения источника постоянного тока $E_{d\beta}$ и соответствующих ЭДС e_{2a}, e_{2b}. Временные диаграммы напряжений и токов, иллюстрирующие работу схемы, приведены на рис. 37.24.

Каждый вентиль включается с опережением на угол $0<\beta<\pi/2$ относительно начала отрицательного полупериода (причем $\beta=\pi-\alpha$, где $\alpha>\pi/2$ — угол управления или угол задержки отпирания, отсчитываемый относительно начала положительного полупериода).

При включении очередного вентиля в момент, определяемый углом опережения β, начинается процесс коммутации, и ток с предыдущего вентиля в течение интервала γ переходит на следующий, так как потенциал его анода выше, чем у ранее проводившего ток вентиля. Для запирания каждого вентиля необходимо не только уменьшение до нуля его анодного тока, но и обеспечение необходимого времени, в течение которого к вентилю прикладывается обратное напряжение и он восстанавливает свои запирающие свойства до того, как к нему будет опять приложено положительное напряжение; это время определяется углом δ (рис. 37.24).

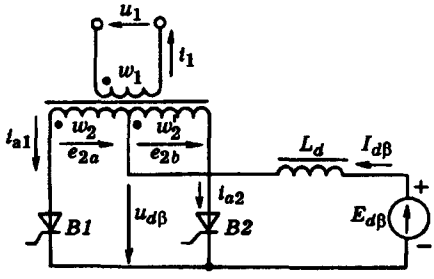


Рис. 37.23. Нулевая схема однофазного зависимого инвертора

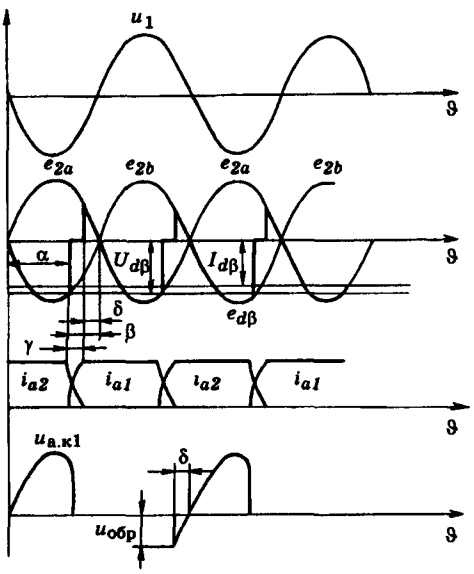


Рис. 37.24. Временные диаграммы напряжений и токов в схеме рис. 37.23

Таким образом, для нормальной работы инвертора необходимо, чтобы $\delta \geq \delta_{кр}$ и

$$\beta = \gamma + \delta \geq \gamma + \delta_{кр},$$

где $\delta_{кр} = t_q \cdot 2\pi f_c$; t_q — время выключения данного конкретного вентиля, необходимое для восстановления его запирающих свойств (указывается в паспорте прибора).

Сглаживающий дроссель L_d воспринимает разность напряжения источника питания $E_{d\beta}$ и мгновенного значения противоЭДС инвертора $e_{d\beta}$ (показано жирной линией на второй диаграмме сверху на рис. 37.24).

Среднее значение инвертируемого тока $I_{d\beta}$ при бесконечно большой индуктивности сглаживающего дросселя L_d связано с углами β и γ следующей зависимостью:

$$I_{d\beta} = \frac{\sqrt{2}\,E_2}{X_a}\left[\cos(\beta-\gamma)-\cos\beta\right],$$

где X_a — анодная индуктивность, определяемая в основном индуктивностью рассеяния обмоток инверторного трансформатора; E_2 — действующее значение напряжения фазы трансформатора.

Среднее значение противоЭДС инвертора $U_{d\beta}$, которое уравновешивает питающее постоянное напряжение $E_{d\beta}$, определяется соотношением

$$E_{d\beta} = U_{d\beta} = \frac{1}{\pi}\int_{-\beta+\gamma}^{\pi-\beta} 2\sqrt{2}\,E_2 \sin\vartheta\, d\vartheta =$$

$$= U_{d0}\left[\frac{\cos(\beta-\gamma)+\cos\beta}{2}\right].$$

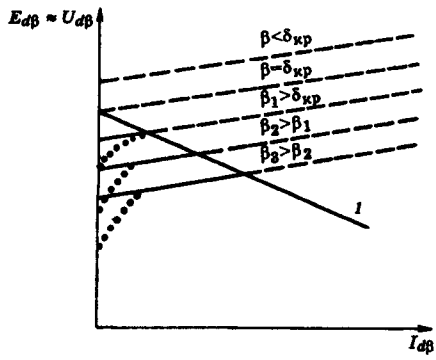


Рис. 37.25. Входные характеристики инвертора, ведомого сетью

Связь питающего инвертор напряжения $E_{d\beta}$ и тока $I_{d\beta}$ называют входной характеристикой инвертора. Уравнение этой характеристики без учета падения напряжения на вентилях и активных сопротивлениях схемы для m-фазного инвертора имеет вид:

$$E_{d\beta} = U_{d0}\cos\beta + \frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}.$$

В этом соотношении слагаемое $U_{d0}\cos\beta$ — противоЭДС инвертора при данном угле β и холостом ходе (когда $\gamma = 0$); второе слагаемое $\frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}$ — добавка напряжения, необходимая с учетом явления перекрытия токов в течение интервала γ при коммутации.

Входные характеристики ведомого сетью инвертора приведены на рис. 37.25. На том же рисунке точечными линиями показаны начальные участки входных характеристик при малых значениях тока $I_{d\beta}$ и индуктивности $L_{d\beta}$, когда входной ток имеет прерывистый характер.

Рабочая область на входных характеристиках лежит ниже ограничительной характеристики инвертора (линии *1* на рис. 37.25), которая определяет геометрическое место точек, соответствующих предельно возможным значениям $I_{d\beta}$ и $E_{d\beta}$ при заданном угле восстановления $\delta = \delta_{кр}$ и различных углах β. Ограничительная характеристика описывается выражением

$$E_{d\beta пред} = U_{d0}\cos\delta_{кр} - \frac{mX_a}{2\pi} I_{d\beta}.$$

Очевидно, что при $\beta<\delta_{кр}$ работа инвертора невозможна. При $\beta = \delta_{кр}$ теоретически можно работать лишь при токе $I_{d\beta} = 0$, так как стоит увеличить ток, как появится угол коммутации γ и угол δ станет меньше $\delta_{кр}$ (пунктир на рис. 37.25). Следовательно, при $I_{d\beta}>0$ можно работать при таких углах β, чтобы находиться в области, расположенной ниже линии *1* на рис. 37.25 (сплошные линии).

37.7. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Коэффициент мощности преобразовательной установки характеризует соотношение потребляемой от сети (или отдаваемой в сеть в случае инвертора) переменного тока активной мощности к полной мощности

$$\chi = P/S,$$

где в случае синусоидального (без искажений) напряжения сети $P = U_1 I_{1(1)}\cos\varphi_{(1)}$ — активная мощность; $I_{1(1)}$ — действующее значение первой гармоники сетевого тока; $\varphi_{(1)}$ — угол сдвига между первой гармоникой тока сети и синусоидой напряжения сети; $S = U_1 I_1$ — полная мощность переменного тока, определяемая произведением действующих значений напряжения и тока.

Коэффициент мощности любого преобразователя всегда меньше единицы, так как кривая тока сети отличается от синусоиды, а его первая гармоника сдвинута по фазе по отношению к синусоиде напряжения сети. Наличие фазового сдвига, обусловленного явлением перекрытия токов вентилей при коммутации и фазовым регулированием выпрямленного напряжения, свидетельствует о том, что преобразователь потребляет от сети реактивную мощность. Потребление реактивной мощности и наличие в сети кривой тока высших гармонических приводит к увеличению действующего значения тока сети и росту потерь в сети переменного тока при передаче энергии от сети к преобразователю (или в обратном направлении).

Коэффициент мощности преобразовательной установки

$$\chi = k_I \cos\varphi_{(1)},$$

где k_I — коэффициент искажения формы тока сети, определяемый наличием высших гармонических,

$$k_I = \frac{I_{(1)}}{I_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{n=k_{m\pm1}}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_{1(1)}^2}}}.$$

где $k = 1, 2, 3...$

Коэффициент искажений зависит от числа фаз преобразования m и в предположении, что угол перекрытия $\gamma = 0$, составляет: $k_I = 0{,}935$ при $m = 3$; $k_I = 0{,}955$ при $m = 6$; $k_I = 0{,}988$ при $m = 12$.

Коэффициент сдвига $\cos\varphi_{(1)}$ определяется углом сдвига первой гармоники тока сети по отношению к синусоиде напряжения сети. Угол коммутации γ вызывает дополнительный фазовый сдвиг первой гармоники сетевого тока в сторону отставания, поэтому у выпрямителя $\cos\varphi_{(1)} \approx \cos(\alpha+\gamma/2)$. Так как в инверторе угол β отсчитывается в сторону опережения, $\cos\varphi_{(1)} \approx \cos(\beta-\gamma/2)$.

Таким образом, коэффициент мощности выпрямителя составляет

$$\chi = k_I \cos(\alpha+\gamma/2),$$

а инвертора

$$\chi = k_I \cos(\beta-\gamma/2).$$

37.8. ВЫПРЯМИТЕЛИ С НУЛЕВЫМ ВЕНТИЛЕМ И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

Некоторое улучшение коэффициента мощности управляемого выпрямителя может быть достигнуто, если цепь нагрузки, содержащую значительную индуктивность, шунтировать диодом VD_0 (рис. 37.26, *а*). Такой диод, называемый нулевым (или шунтирующим), будет отпираться в однофазной двухполупериодной нулевой или мостовой схеме в моменты перехода переменного напряжения через нуль, в результате чего в кривой выпрямленного напряжения u_d будут отсутствовать площадки с отрицательным напряжением (рис. 37.26, *б*), имеющиеся при работе обычного управляемого выпрямителя при $\alpha \neq 0$, что означает снижение пульсаций u_d и i_d. Среднее значение выпрямленного напряжения при этом равно

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}\, E_2 \sin\vartheta\, d\vartheta = U_{d0}\frac{1+\cos\alpha}{2}.$$

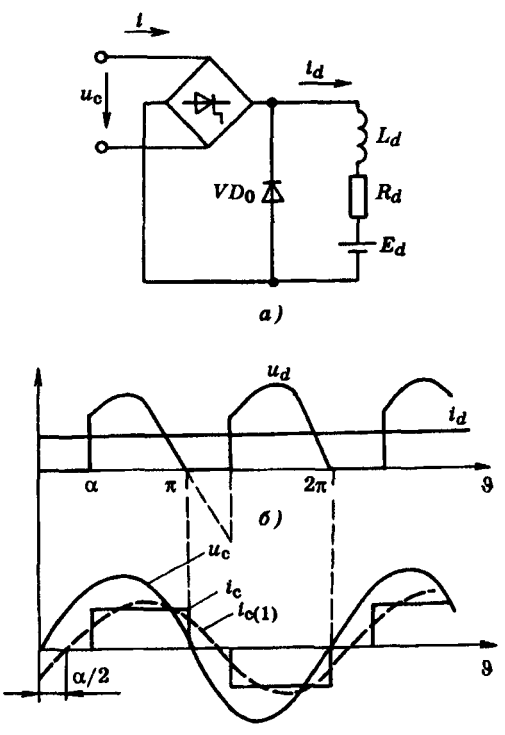


Рис. 37.26. Схема выпрямителя с шунтирующим (нулевым) диодом (*а*) и диаграммы напряжения и токов (*б* и *в*)

Следовательно, для регулирования напряжения в полном диапазоне от U_{d0} до нуля необходимо угол α изменять в диапазоне $0\div180^\circ$. Длительность импульсов анодного тока и, следовательно, тока, потребляемого от сети, при наличии нулевого диода получается равной $\pi-\alpha$ (рис. 37.26, *в*). При этом первая гармоника первичного тока выпрямителя $i_{c(1)}$ сдвинута относительно синусоиды напряжения сети на угол $\varphi_{(1)} = \alpha/2$ (в предположении, что угол коммутации $\gamma = 0$), и, следовательно, коэффициент сдвига равен

$$\cos\varphi_{(1)} = \cos\alpha/2.$$

Коэффициент искажения кривой тока

$$\nu = \frac{I_{(1)}}{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\frac{\cos\alpha/2}{\sqrt{1-\alpha/\pi}}$$

и коэффициент мощности

$$\chi = \nu\cos\varphi_{(1)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{1+\cos\alpha}{\sqrt{1-\alpha/\pi}}.$$

На рис. 37.27 показаны зависимости коэффициентов ν, $\cos\varphi_{(1)}$ и χ от степени управления $G = U_{d\alpha}/U_{d0}$ для рассматриваемого случая. Там же штриховой линией показана зависимость $\chi_1 = f(G)$ для однофазного мостового выпрямителя с полным числом управляемых вентилей (у которого $\nu = 2\sqrt{2}/\pi = \text{const}$). Видно, что добавление нулевого диода позволяет практически во всем диапазоне регулирования поднять коэффициент мощности на 0,15÷0,2.

При переходе к выпрямителям с большим числом m ($m = 3$ и тем более $m = 6$) влияние нулевого диода снижается.

Другой, но схожий по результатам способ улучшения коэффициента мощности связан с применением несимметричных мостовых схем, в которых половина вентилей являются управляемыми, поло-

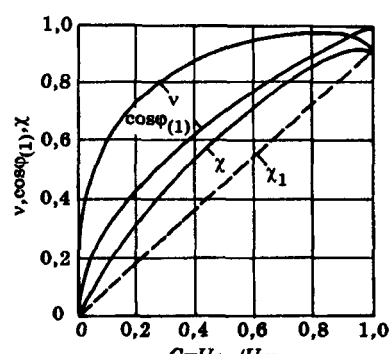


Рис. 37.27. Зависимости коэффициентов искажения потребляемого тока ν, сдвига $\cos\varphi_{(1)}$ и мощности χ от степени регулирования напряжения для однофазных мостовых несимметричных выпрямителей (сплошные линии) и коэффициента χ для обычных однофазных выпрямителей (штриховая линия)

вина — неуправляемыми; такие схемы иногда называют полууправляемыми.

На рис. 37.28, *а* и *в* показаны два варианта однофазных несимметричных выпрямителей, а на рис. 37.28, *б* и *г* — соответствующие диаграммы напряжений и токов. Видно, что в обеих схемах кривая выпрямленного напряжения U_d и кривая потребляемого от сети тока имеют такой же вид, как у однофазного выпрямителя с нулевым диодом. Поэтому и все соотношения, приведенные выше для последней схемы, а также зависимости на рис. 37.27 справедливы и для обоих выпрямителей по рис. 37.28, *а* и *в*.

Рассматривая последовательность работы вентилей (см. диаграммы для тока i_d на рис. 37.28, *б* и *г*) можно обнаружить различие этих двух несимметричных выпрямителей. В схеме рис. 37.28, *а* оба диода *2* и *3* отпираются каждый полупериод и проводят ток во время пауз в кривой u_d, играя тем самым роль нулевого диода. При этом длительность работы каждого диода равна $\pi+\alpha$, в то время как длительность работы каждого тиристора составляет $\pi-\alpha$, т.е. токовая загрузка вентилей не одинакова. Этот недостаток отсутствует в схеме рис. 37.28, *в*, где интервалы проводимости всех четырех вентилей *1—4* равны π. Кроме того, в последней схеме оба тиристора имеют эквипотенциальные катоды и могут управляться от одного блока управления без разделительных трансформаторов.

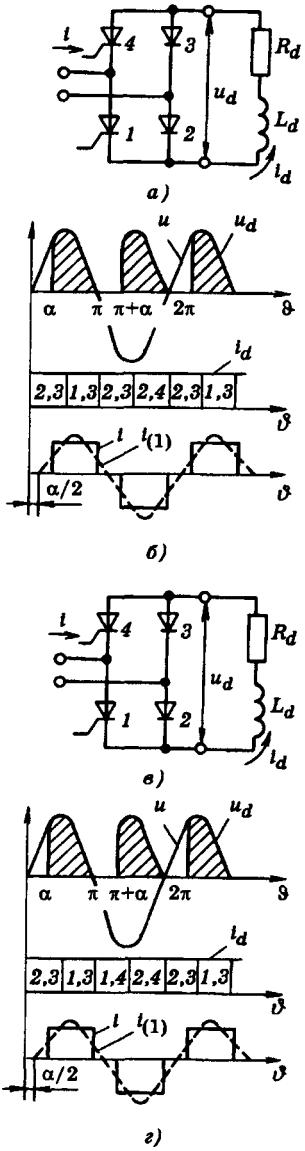


Рис. 37.28. Однофазные мостовые несимметричные (полууправляемые) выпрямители (*а* и *в*) и диаграммы напряжений и токов (*б* и *г*)

В трехфазном мостовом несимметричном выпрямителе (схема по рис. 37.12, *д* при использовании в качестве вентилей *VD1*, *VD3*, *VD5* тиристоров) напряжение между нулевой точкой вторичных обмоток трансформатора и точкой *а* (общей шиной анодов диодов) изменяется так же, как в неуправляемом трехфазном нулевом выпрямителе, а напряжение между нулевой точкой вторичных обмоток трансформатора и общей точкой *б* (общей шиной катодов тиристоров), как в таком же управляемом выпрямителе (кривые u_{a0} и u_{b0} на рис. 37.29, *а*). Напряжение на нагрузке $u_{d\alpha}$ равно разности мгновенных значений u_{b0} и u_{a0} (рис. 37.29, *б*). Среднее значение напряжения на нагрузке

$$U_{d\alpha} = U_{d0}\frac{1+\cos\alpha}{2},$$

где $U_{d0} = 2{,}34E_{2\phi}$.

При $\alpha \geq 60°$ на некотором интервале мгновенное значение напряжения на нагрузке оказывается равным нулю. При этом в случае чисто активной нагрузки ток падает до нуля. При активно-индуктивной нагрузке ток i_d может оставаться и непрерывным, замыкаясь через два вентиля, подключенных

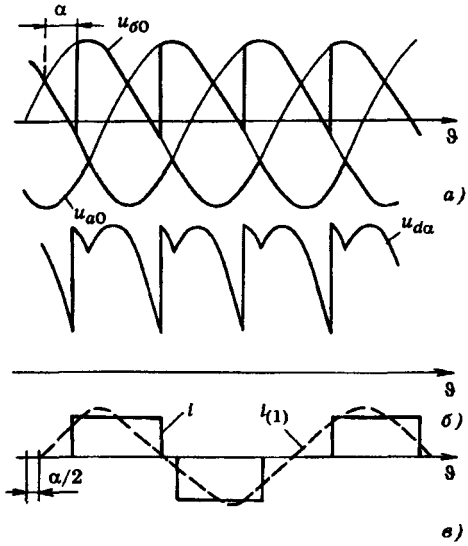


Рис. 37.29. Диаграммы напряжений и тока в трехфазном несимметричном полууправляемом выпрямителе

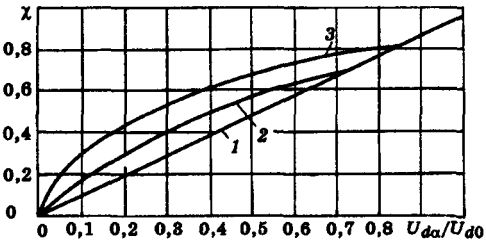


Рис. 37.30. Зависимости коэффициента мощности трехфазного мостового управляющего выпрямителя от выходного напряжения при различных алгоритмах управления

к одной фазе (например, через диод *VD4* и тиристор *VD1*, см. рис. 37.12, *д*).

На рис. 37.29, *в* показаны кривая потребляемого от сети тока i и его первая гармоника $i_{(1)}$, сдвиг которой относительно напряжения сети определяется углом $\varphi_{(1)} = \alpha/2$. Следовательно, $\cos\alpha_{(1)} = \cos\alpha/2$.

Действующее значение первой гармоники тока

$$I_{(1)} = \frac{\sqrt{6}\, I_d}{\pi} \cos\alpha/2,$$

причем это выражение, как и выражение для коэффициента сдвига, справедливо во всем диапазоне изменения α от 0 до 180°. Действующее значение потребляемого тока при $\alpha<\pi/3$ (этот случай показан на рис. 37.29) неизменно и равно $I = \sqrt{\frac{2}{3}}\, I_d$. Следовательно, при $\alpha<\pi/3$

$$\nu = \frac{3}{\pi}\cos\frac{\alpha}{2};$$

$$\chi = \frac{3}{\pi}\cos^2\frac{\alpha}{2} = \frac{3}{\pi}\frac{1+\cos\alpha}{2}.$$

В диапазоне $\pi/3 < \alpha < \pi$

$$I = I_d\sqrt{1-\alpha/\pi}\,;\quad \nu = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\frac{\cos\alpha/2}{\sqrt{1-\alpha/\pi}}\,;$$

$$\chi = \sqrt{\frac{2}{3}}\,\frac{1+\cos\alpha}{\pi\sqrt{1-\alpha/\pi}}.$$

На рис. 37.30 кривая *2* соответствует зависимости $\chi = f(U_{d\alpha}/U_{d0})$, линия *1* показывает аналогичную зависимость для симметричного выпрямителя, когда коэффициент мощности уменьшается пропорционально снижению выпрямленного напряжения, кривая *3* соответствует несимметричному режиму. Сопоставление этих кривых показывает, что в диапазоне $U_{d\alpha}/U_{d0} = 0{,}6 \div 0{,}1$ несимметричный мостовой выпрямитель дает увеличение коэффициента мощности на 0,07÷0,1.

Инверторный режим в таких схемах, как и в схемах с нулевым диодом, невозможен.

37.9. РЕВЕРСИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ДВУМЯ ВЕНТИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКТАМИ

СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДВУХКОМПЛЕКТНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Изменение направления тока в нагрузке, необходимое на практике (реверсивный вентильный электропривод, электротехнология и т.д.), может быть осуществлено без применения переключающих аппаратов с помощью двух комплектов вентилей, каждый из которых обеспечивает протекание тока только в одном направлении.

Все существующие схемы реверсивных преобразователей можно разделить на два класса: перекрестные "восьмерочные" и встречно-параллельные схемы.

В перекрестных схемах (рис. 37.31, *а* для нулевых схем и *б* — для мостовых схем) трансформатор имеет две изолированные вентильные обмотки, каждая из которых питает свой комплект вентилей (либо используются два трансформатора).

Во встречно-параллельных схемах (рис. 37.31, *в*) трансформатор существенно упрощается, а может даже отсутствовать.

В зависимости от полярности напряжения на нагрузке и направления тока в ней в реверсивном преобразователе возможны следующие режимы:

1. Напряжение и ток совпадают и имеют прямое направление — первый комплект вентилей (*УВ1*)

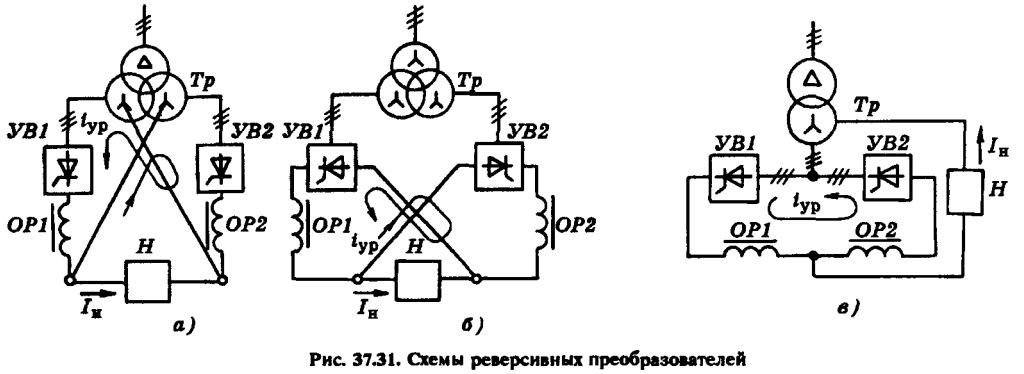


Рис. 37.31. Схемы реверсивных преобразователей

а и б — перекрестные схемы; в — встречно-параллельная схема; Н — нагрузка; ОР1 и ОР2 — ограничительные реакторы

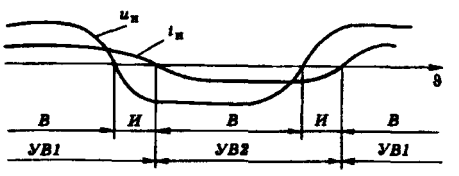


Рис. 37.32. Временные диаграммы напряжения и тока нагрузки реверсивного преобразователя

работает в выпрямительном режиме *В* (рис. 37.32), при этом угол управления α_1 у вентилей этого комплекта $0<\alpha_1<90°$. Нагрузка потребляет энергию.

2. Напряжение на нагрузке обратное, но ток в нагрузке продолжает протекать в прямом направлении — комплект *УВ1* работает инвертором *И* ($90°<\alpha_1<180°$). Энергия из цепи нагрузки отдается в сеть.

3. Напряженне и ток нагрузки обратные — комплект *УВ2* работает выпрямителем ($0<\alpha_2<90°$), и нагрузка потребляет энергию.

4. Напряжение на нагрузке прямое, а ток в нагрузке обратный — *УВ2* работает в инверторном режиме ($90°<\alpha_2<180°$), и нагрузка отдает энергию в сеть.

Перевод преобразователя и нагрузки из одного режима в другой в соответствии с рис. 37.32 может производиться путем воздействия на углы управления вентильными комплектами. Последовательность режимов, показанная на рис. 37.32, характерна для активно-индуктивной нагрузки, например, для случая, когда преобразователь питает обмотку возбуждения двигателя или обмотку электромагнита.

На практике возможен и другой порядок следования режимов реверсивного преобразователя, характерный для случая питания цепи якоря машины постоянного тока. Если происходит разгрузка двигателя постоянного тока, включенного в качестве нагрузки в одну из схем рис. 37.31, то напряжение на якоре за счет повышения скорости увеличивается. Вентильный комплект, работавший до этого в выпрямительном режиме (например, *УВ1*), запирается, если его угол α_1 не изменился. Ток нагрузки изменяет свое направление и переходит на другой комплект *УВ2*, который начинает работать в инверторном режиме. Когда вследствие торможения двигателя его ЭДС вновь оказывается равной напряжению первого комплекта, определяемому старым либо новым значением угла α_1, этот комплект вновь принимает ток и работает в выпрямительном режиме.

В реверсивных преобразователях необходимо, чтобы переход тока от одного вентильного комплекта к другому проходил без пауз, ухудшающих динамическое свойство установки, и чтобы в контуре, образованном обеими группами (в схемах на рис. 37.31 этот контур показан стрелками), отсутствовал непрерывный уравнительный ток, бесполезно загружающий вентили и трансформатор. Эти требования выполняются, если равны постоянные составляющие напряжения комплекта, пропускающего ток нагрузки и работающего в выпрямительном либо

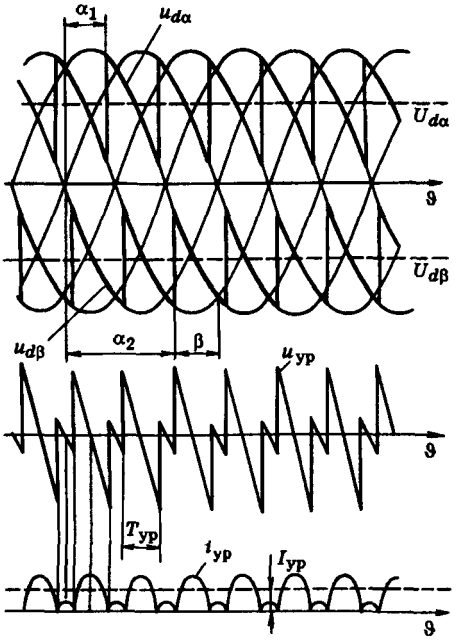


Рис. 37.33. Временные диаграммы напряжений и тока в схеме реверсивного преобразователя рис. 37.31

инверторном режиме, и другого комплекта, через который ток нагрузки в данный момент времени не проходит и управление которым подготовлено соответственно к инверторному или выпрямительному режиму. Таким образом,

$$U_{d\alpha} = U_{d\beta}.$$

Однако даже при равенстве средних значений напряжений обоих комплектов их мгновенные значения оказываются неравными (рис. 37.33). Под действием разности мгновенных значений напряжений $u_{d\alpha}-u_{d\beta} = u_{ур}$ в контуре, включающем в себя оба комплекта вентилей, протекает уравнительный ток $i_{ур}$.

Зависимость средних значений напряжений каждого из комплектов вентилей от углов управления этими комплектами α и β (регулировочная характеристика) при непрерывном токе нагрузки и допущении, что коммутация мгновенная, определяется косинусоидальным законом (рис. 37.34)

$$u_{d\alpha} = U_{d0}\cos\alpha;$$

$$u_{d\beta} = U_{d0}\cos\beta.$$

При равенстве средних значений напряжений

$$U_{d0}\cos\alpha = U_{d0}\cos\beta$$

углы равны: $\alpha = \beta$, а ток $i_{ур}$ имеет начально-непрерывный характер (см. рис. 37.33).

Последнее выражение, обеспечивающее равенство средних значений напряжений комплектов вентилей, может быть записано в другом виде. Если учесть, что для инверторного режима $\beta = 180° - \alpha$,

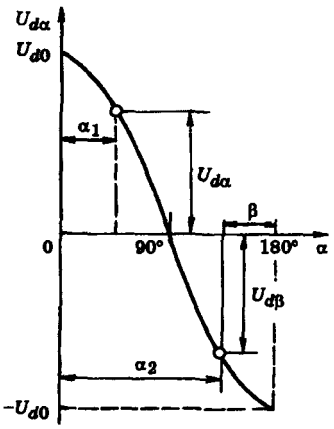


Рис. 37.34. Регулировочная характеристика

получаем $\alpha_1+\alpha_2 = 180°$, где α_1 и α_2 — углы управления первого и второго комплектов вентилей, отсчитываемые от точки естественного отпирания.

В случае, когда управляющие импульсы подаются одиовременно на вентили обоих комплектов, а углы управлення соответствуют приведенным выше равенствам, управление называют согласованным.

Внешние характернстики выпрямительного и инверторного комплектов при указанных соотношениях между углами управления являются продолжением одна другой (рис. 37.35).

Для обеспечения такой связи между углами α_1 и α_2 необходимо, чтобы характеристики вход-выход систем импульсно-фазового управления (СИФУ) обоими комплектами вентилей, т.е. зависимости между изменением фазы их выходных импульсов и сигналом управления $\alpha = f(U_{упр})$, были зеркально подобными.

Частным случаем симметричной фазовой характеристики СИФУ является лннейная зависимость между изменением фазы управляющих импульсов системы и сигналом управлення. Однако чаще используются системы управления с арккосинусоидальной характеристикой $\alpha = K \arccos(I_{упр})$, при которой результирующая регулировочная характеристика преобразователя $U_d = f(U_{упр})$ получается линейной, что позволяет иметь постоянный коэффициент усиления во всем диапазоне регулирования.

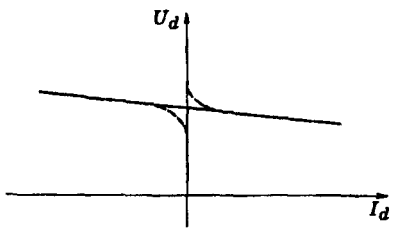


Рис. 37.35. Внешняя характеристика реверсивного преобразователя

УРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТОК

Как уже было отмечено выше, в схемах реверсивных преобразователей с двумя комплектами вентилей имеется замкнутый контур, по которому под действием разности мгновенных значений напряжений комплектов вентилей, минуя цепь нагрузки, протекает ток, называемый уравнительным (см. рнс. 37.31 и 37.33). Уравнительный ток вызывает дополнительные потери в вентилях и обмотках трансформатора, а в переходных режимах может приводить к аварийным отключениям защиты.

В общем случае уравнительный ток в реверсивном контуре определяется дифференциальным уравнением

$$L_{ур}\frac{di_{ур}}{dt} + R i_{ур} = u_{d\alpha} + u_{d\beta} = u_{ур},$$

где $i_{ур}$ — мгновенное значение уравнительного тока; $L_{ур}$ — полная индуктивность реверсивного контура; R — полное активное сопротнвление реверсивного контура; $u_{d\alpha}$, $u_{d\beta}$ — мгновенные значения напряжения первого и второго комплектов реверсивного преобразователя.

Поскольку активное сопротнвление контура гораздо меньше индуктивного, то им можно пренебречь. Тогда

$$i_{ур} \approx \frac{1}{L_{ур}}\int_0^t u_{ур}\,dt.$$

РАЗДЕЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКТАМИ

Рассмотренный выше способ позволяет ограничить лншь динамический уравнительный ток. Полное устраненне уравнительного тока может быть получено прн раздельном управлении, которое заключается в снятии управляющих импульсов с вентилей того комплекта, который в данный момент не проводит тока. В этом случае один из комплектов вентилей всегда заперт и контур для протекания уравнительного тока отсутствует. Благодаря этому можно исключить из схемы ограничивающие реакторы и полностью использовать установленную мощность преобразователя, так как выпрямительный комплект можно открывать с нулевым углом управлення. Система управления преобразователем при этом однако усложняется, так как приходится вводить в систему датчнки токов комплектов вентилей *УВ* либо датчики тока нагрузки *ДТ* (рис. 37.36),

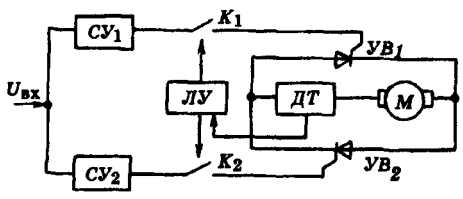


Рис. 37.36. Структурная схема системы управления преобразователями, питающими якорную цепь

которые при спаде тока, протекающего через работающую группу либо тока определенного направления в нагрузке до достаточно малого значения вырабатывают команды, подаваемые на логическое устройство *ЛУ*, управляющее ключами K_1 и K_2, для снятия управляющих импульсов с системы управления $СУ_1$ и $СУ_2$ данного комплекта и на подачу импульсов на другой комплект с задержкой, превышающей время восстановления вентилей. Углы управления вышедшего из работы и вновь вступившего в работу комплектов должны отвечать уравнению согласованного управления $\alpha_1+\alpha_2 = 180°$, чтобы непрерывность результирующей регулировочной характеристики не нарушалась. В то же время одновременная работа вентильных комплектов должна быть надежно исключена даже в течение коротких интервалов, поскольку при отсутствии ограничивающих реакторов броски уравнительного тока могут быть весьма значительными.

Логическое переключающее устройство может быть двухпозиционным (когда управляющие импульсы подаются на один из вентильных комплектов, за исключением паузы) либо трехпозиционным с зоной нечувствительности, в которой импульсы не подаются ни на одну из групп. В трехпозиционной системе во время паузы система регулирования оказывается разомкнутой, что в ряде случаев недопустимо.

Когда преобразователь питает пассивную цепь (обмотка возбуждения какой-либо машины M, обмотка электромагнита), система управления относительно простая (рис. 37.36). Переключение комплектов происходит в функции знака сигнала управления, а логическое устройство не разрешает произвести переключение до тех пор, пока не уменьшится ток нагрузки. При питании якорной цепи требуется более сложная система управления, так как рекуперативный режим возможен в этом случае при сохранении знака управляющего сигнала (подтормаживание двигателя). Поэтому для создания сигнала, воздействующего на переключение комплектов, необходимо включить вентильный преобразователь в замкнутую систему регулирования. При этом ширина зоны нечувствительности, при которой не будут происходить переключения, находится в обратной зависимости от коэффициента усиления системы регулирования. Необходимость такой обратной связи лишает преобразователь той автономности, которой обладает реверсивный преобразователь с согласованным управлением.

От этого недостатка свободна схема со сканирующей логикой (рис. 37.36), в которой *ЛУ* не связано с сигналом управления и находится постоянно в режиме поиска нужного комплекта (при отсутствии запрета со стороны датчика тока). Благодаря этому происходит постоянное переключение комплектов до тех пор, пока не появится ток в одном из них.

37.10. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ

Для преобразования переменного напряжения одной частоты f_1 в переменное напряжение другой, более низкой частоты $f_2<f_1$ используются либо системы выпрямитель-инвертор с промежуточным звеном постоянного тока, либо преобразователи частоты с непосредственной связью (ПЧНС) с естественной коммутацией тока вентилей. Преобразователи этого типа позволяют осуществить регулирование как выходного напряжения от 0 до U_{2max}, так и частоты f_2 от 0 до примерно $0{,}5f_1$. При этом регулирование напряжения и частоты может осуществляться независимо. Часто число фаз на входе ПЧНС m_1 и на его выходе m_2 может быть неодинаково ($m_1>m_2$). ПЧНС широко используются для питания низкочастотных регулируемых электроприводов (шахтные подъемники, шаровые мельницы цементных заводов, механические ножницы и др.). Кроме того, ПЧНС применяют для питания обмоток электромагнитов ускорителей, в установках для перемешивания жидкого металла и т. п.

ПЧНС строятся по схемам, идентичным схемам реверсивного преобразователя. Схемы на рис. 37.31 при периодическом изменении углов управления могут быть примером трехфазно-однофазных ПЧНС ($m_1 = 3$; $m_2 = 1$). Наличие двух вентильных комплектов позволяет получить на нагрузке напряжение изменяющейся полярности при токе, который может изменять свое направление.

Так как среднее значение напряжения на выходе каждого комплекта зависит от угла регулирования α:

$$U_2 = E_{d0}\cos\alpha(t),$$

где $\alpha(t)$ — определенная функция времени, то для получения на выходе ПЧНС синусоидально изменяющегося напряжения с амплитудой E_{d0} и частотой $\omega_2 = 2\pi f_2$ (без учета высокочастотных пульсаций)

$$U_2 = E_{d0}\sin(\omega_2 t)$$

необходимо изменять углы регулирования α_1 и α_2 первого и второго комплектов вентилей по арккосинусоидальному закону:

$$\alpha_1 = \arccos(\nu \sin\omega_2 t);$$

$$\alpha_2 = \arccos(-\nu \sin\omega_2 t),$$

где $\nu = U_2/E_{d0}$ — степень управления по амплитуде выходного напряжения U_2.

При $\nu = 1$ имеет место максимальная амплитуда выходного напряжения ПЧНС. В этом частном случае углы регулирования α_1 и α_2 должны изменяться во времени по линейному закону (рис. 37.37, *г*).

Для получения положительной полуволны выходного напряжения U_2 при чисто активной нагрузке необходимо изменять угол α_1 от $\pi/2$ до 0 и затем от 0 до $\pi/2$. Отрицательная полуволна формируется при работе второго комплекта, у которого угол α_2 изменяется аналогично от $\pi/2$ до 0 и затем от 0 до $\pi/2$.

На рис. 37.37 приведены временные диаграммы, поясняющие работу ПЧНС с однофазным выходом

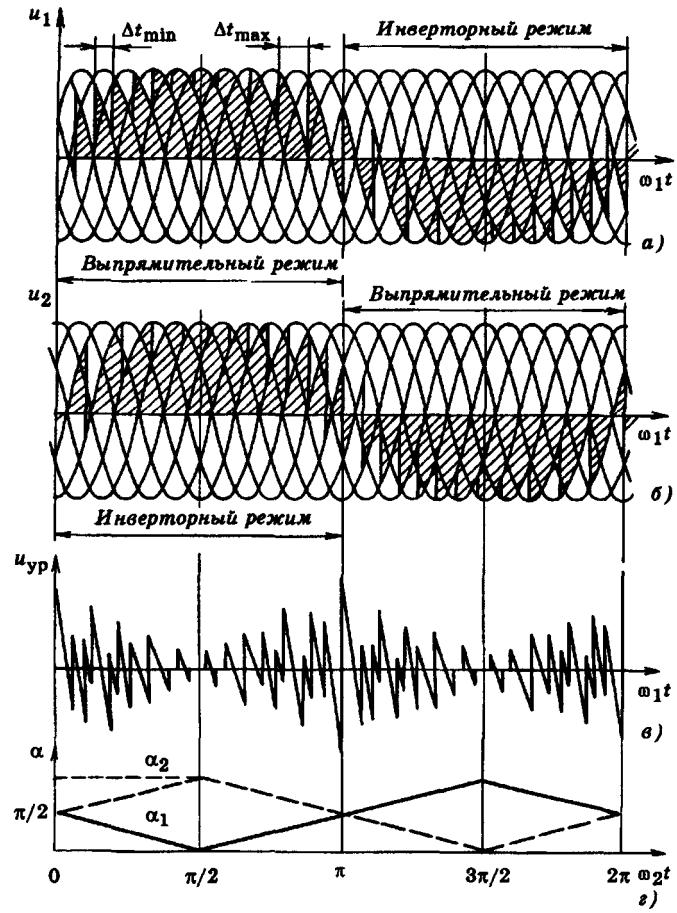


Рис. 37.37. Временные диаграммы напряжений и токов (*а*—*в*), кривые изменения углов регулирования α_1 и α_2 во времени (*г*) в трехфазно-однофазном ПЧНС

($m = 1$) при выполнении каждого комплекта преобразователя по шестифазной ($m = 6$) схеме (например, по трехфазной мостовой) для $N = \omega_1/\omega_2 = 4$. Из-за того что коммутация тока и восстановление запирающих свойств тиристоров происходят не мгновенно, приходится ограничивать максимальные углы открытия вентилей значениями, существенно меньшими π.

При работе ПЧНС углы α_1 и α_2 изменяются не плавно, а дискретно в соответствии с дискретным характером работы отдельных вентилей.

Как и в реверсивных преобразователях, в ПЧНС возможно как раздельное, так и согласованное управление вентильными комплектами. При согласованном управлении из-за того, что $\alpha_{max} < \pi$, приходится ограничивать и минимальные значения углов α, т. е. практически $\alpha_{min} > 0$.

При согласованном управлении вентильными комплектами в ПЧНС из-за разности мгновенных значений напряжения на выходе вентильного комплекта, работающего в выпрямительном режиме, и внутренней противоЭДС комплекта, работающего в инверторном режиме, возникает уравнительное напряжение $u_{ур}$ (см. рис. 37.37, *в*) и протекает уравнительный ток. Для его ограничения в цепь каждого вентильного комплекта вводятся ограничивающие реакторы, а также используется раздельное управление вентильными комплектами.

Так как в рассматриваемых преобразователях происходит однократное преобразование электрической энергии, то такие преобразователи имеют более высокий КПД, чем преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. К достоинствам ПЧНС относится также возможность двустороннего обмена энергией между сетью и нагрузкой, что осуществляется за счет возможности работы вентильных комплектов в выпрямительном и инверторном режимах.

ПЧНС с трехфазным выходом ($m = 3$) образуют из трех однофазных преобразователей.

37.11. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Наиболее распространенными являются *многоканальные синхронные системы управления* (МСУ), построенные по вертикальному принципу. Особенностью МСУ является то, что формирование и фазовый сдвиг импульсов осуществляются в отдельном канале для каждого вентильного плеча

многофазного преобразователя; каждый канал, как правило, содержит последовательно включенные сетевой фильтр, генератор развертки, синхронизированный с сетью, пороговое устройство, выходной формирователь.

Пороговое устройство сравнивает напряженне развертки с управляющим напряжением и при их равенстве выдает импульс на выходной формирователь. В качестве источника напряжения развертки используют генератор линейно изменяющегося напряжения или синусоидальное напряжение сети. В последнем случае при соответствующей фазировке напряжения развертки относительно моментов естественной коммутации тиристоров результирующая регулировочная характеристика преобразователя получается линейной $U_д = f(U_{упр}) = KU_{упр}$.

Достоинством МСУ является простота структурной схемы.

Основной недостаток — необходимость подстройки каналов с целью их симметрирования. Асимметрия импульсов по каналам $\Delta\alpha$ на практике составляет 2÷3°. Недостатком также являются повышенные аппаратурные затраты, увеличивающиеся пропорционально числу каналов.

С развитием средств интегральной схемотехники все большее применение находят *одноканальные синхронные системы управления*. Рассмотрим сначала систему с сокращенным числом каналов, в которой импульсы для двух противофазных вентильных плеч сдвигаются в одном канале. Число каналов таких систем равно $m/2$ (m — число фаз преобразователя, которое предполагается четным, но при этом в каждом канале необходимы дополнительные логические схемы). При современном развитии средств микроэлектроники это не является большим усложнением. В такой системе по-прежнему необходимы настроечные элементы, хотя их число и снижается в 2 раза (по сравнению с m-канальными системами).

Схема одного канала (для управления двумя противофазными тиристорами) показана на рис. 37.38. Сетевой фильтр *Ф* сглаживает импульсные помехи в напряжении сети. Пороговые элементы *ПЭ1* и *ПЭ2* формируют из синусондального напряжения два ступенчатых напряжения, имеющих взаимный фазовый сдвиг на 180°—δ ($\delta \approx 3 \div 5°$). Благодаря такому сдвигу на выходе логической схемы *Э1* имеет место совпадение сигналов длительностью $\tau = \delta/\omega_c$ (ω_c — частота сети). На выходе *Э1*, таким образом, формируются короткие синхронизирующие импульсы, запускающие (синхронизирующие) генератор пилообразного напряжения *ГПН*. На входе нуль-органа *НО* (пороговый элемент) происходит сравнение напряжения пилообразной развертки и напряжения управления $U_{упр}$. С выхода *НО* импульсы поступают на вход логических схем *Э2* и *Э3*, на другие входы которых поданы сигналы с выходов пороговых элементов *ПЭ1* и *ПЭ2*.

Формирование импульсов происходит на выходе той логической схемы, на выходе которой в данный момент времени имеет место совпадение сигналов. Таким образом, происходит распределение импульсов на противофазные тиристоры. Формирователи *ФИ1* и *ФИ2* предназначены для формирования и усиления выходных импульсов. Для управления шестифазным мостовым преобразователем применяют три идентичных канала. Такие формирователи-усилители в настоящее время наиболее перспективны среди многоканальных систем.

В подобных системах управления преобразователями все шире используются серийно выпускаемые интегральные микросхемы общего назначения. Ведутся также работы по созданию специальных микросхем, реализующих отдельные узлы или полный канал системы управления в одном корпусе.

Синхронные одноканальные системы управления, в которых импульсы для всех вентильных плеч сдвигаются в одном общем канале, имеют высокую фазовую симметрию импульсов. Структурная схема такой системы показана на рис. 37.39

Устройство синхронизации *УС* формирует из многофазного напряжения сети импульсы частотой mf_c, которые сдвигаются фазосдвигающими элементами *ФЭ1—ФЭ3*. Далее импульсы распределяются по каналам с помощью распределителя импульсов *РИ*. Применяют *РИ* автономного типа (кольцевые пересчетные схемы, регистры сдвига) и зависимые, выполненные в виде модели силовой части преобразователя. На рис. 37.39 показана система с автономным *РИ*, для которого необходим дополнительный канал синхронизации, осуществляющий формирование и фазовый сдвиг (*ФЭ4*) импульсов для приоритетной ячейки *РИ*.

Наличие отдельного канала для синхронизации *РИ*, достаточно сложного устройства синхронизации *УС* и, наконец, наличие нескольких фазосдвигающих элементов, число которых возрастает с ростом фазности преобразователя ($n = 6 \div 7$ при $m = 12$), ограничивает применение таких систем управления.

В последние годы получили развитие *асинхронные системы управления*. Особенностью асинхронных систем управления является то, что формирование импульсов осуществляется автономным управляемым генератором, а синхронизация с сетевым напряжением и фазовый сдвиг этих импульсов про-

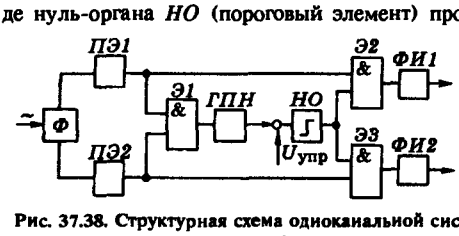


Рис. 37.38. Структурная схема одноканальной системы управления двумя противофазными тиристорами

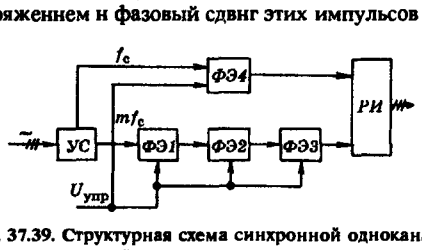


Рис. 37.39. Структурная схема синхронной одноканальной системы управления

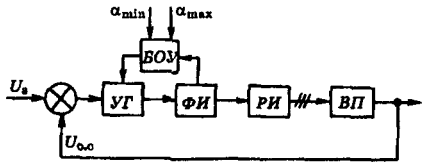


Рис. 37.40. Структурная схема асинхронной системы управления

исходят за счет обратной связи по выходному параметру преобразователя. Таким образом, асинхроиные системы управления функционируют только в замкнутой системе регулирования. Структурная схема асинхронной одноканальной системы управления приведена на рис. 37.40. Управляемый генератор *УГ* в установившемся режиме, когда $U_з = U_{о.с}$ (где $U_з$ — сигнал задания, $U_{о.с}$ — сигнал обратной связи), вырабатывает импульсы частотой $f_г = mf_с$, которые через формирователь *ФИ* и распределитель импульсов *РИ* поступают в циклическом порядке на вентили преобразователя *ВП*. При изменении сигнала задания $U_з$ или отклонении выходного параметра преобразователя иа входе *УГ* возникает сигнал рассогласования, который, воздействуя на геиератор, увеличивает или уменьшает частоту импульсов, что приводит к приращению фазы импульсов и переходу системы в новое состояние равновесия, при котором $U_з = U_{о.с}$. Для обеспечеиия устойчивости системы необходимо ограничить диапазон углов управлеиия значениями углов α_{min} и α_{max} блоком ограничения углов *БОУ*.

Асинхронные одноканальные системы управления нашли применение в преобразователях с высокими требованиями к фазовой симметрии управляющих импульсов, что обеспечивает хороший гармонический состав выходного напряжеиия (тока).

Отсутствие непосредственной связи через устройство синхронизации с сетью позволяет асинхронным одноканальным системам управления устойчиво работать при значительных искажениях напряжения сети. Такие искажеиия особенно велики при соизмеримых мощностях сети и преобразователя, например в линиях передачи постоянного тока. Применение в вентильных электроприводах асиихронных систем ограничивает их инерционность. Однако соответствующим построением управляемого генератора можно достигнуть существенного увеличения быстродействия. Так как при этом иитегральиая составляющая все же остается, то результирующая передаточная функция соответствует пропорциональио-интегральному звену. Поэтому такие асинхронные системы управления имеют перспективы в электроприводах в качестве системы управления преобразователем и в качестве ПИ-регулятора одновременно.

37.12. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 37.41 приведеиы схемы однофазных преобразователей переменного напряжения. В схеме рис. 37.41, *а* применяется встречно-параллельное включение тиристоров; вместо двух тиристоров можно использовать один симметричный тиристор. В схеме рис. 37.41, *б* использовано встречно-параллельное включение тиристоров и диодов, причем оба тиристора имеют эквипотенциальные катоды. На рис. 37.41, *в* приведена схема с использованием всего лишь одного тиристора, включенного в диагонали диодного моста. Особенностью двух последних схем является нулевое обратное напряжение на тиристоре. Потери мощности в схеме рис. 37.41, *в* больше, чем в схеме рис. 37.41, *б*, а в последней больше, чем в схеме рис. 37.41, *а*. Максимальное прямое иапряжение на тиристорах во всех трех схемах и максимальное обратное напряжение в схеме рис. 37.41, *а* равно $\sqrt{2}\,U_с$, в двух последних схемах обратное напряжение на тиристоре равно нулю.

Наибольшее распространение имеет схема рис. 37.41, *а*, которая рассматривается ниже более подробно.

При активной нагрузке ток и напряжение совпадают по форме (рис. 37.42, *а*). Угол управления α может изменяться в пределах от 0 до π.

Действующее значеиие тока тиристора

$$I_{т.д} = I_{д0}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)},$$

где $I_{д0} = U_с/R$ — действующее значение тока нагрузки при $\alpha = 0$.

Среднее значение тока тиристора

$$I_т = \frac{I_{д0}}{\sqrt{2}}\,\frac{1+\cos\alpha}{\pi}.$$

Коэффициент формы кривой тока тиристора

$$K_{ф.т} = \frac{I_{т.д}}{I_т} = \frac{\sqrt{\pi\left(\pi - \alpha + \dfrac{\sin 2\alpha}{2}\right)}}{1+\cos\alpha}.$$

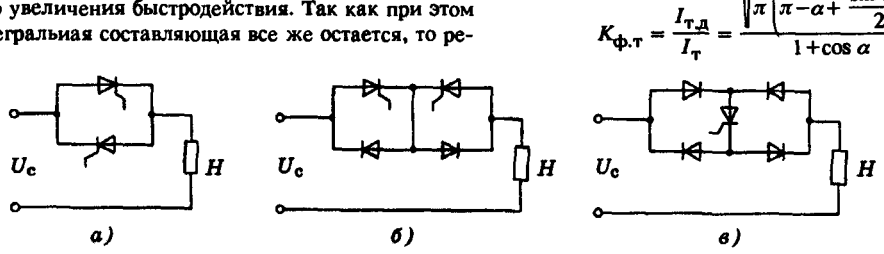


Рис. 37.41. Схемы преобразователей переменного напряжения

а — встречно-параллельное включение; *б* — встречное включение тиристоров и диодов; *в* — мостовая схема с тиристором в диагонали

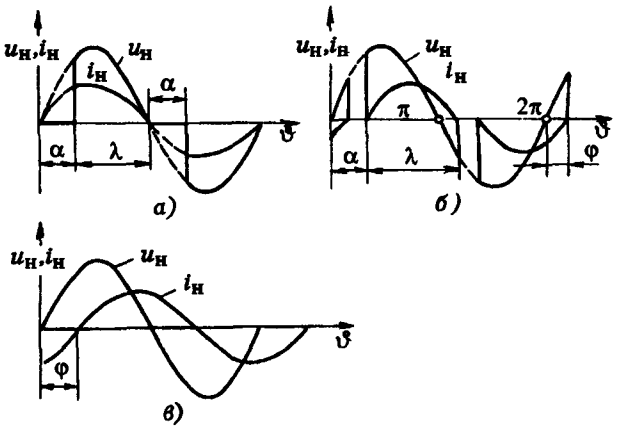


Рис. 37.42. Временные диаграммы напряжений и токов в преобразователе переменного напряжения

Активная мощность, потребляемая от сети,

$$P_а = P\chi^2,$$

где $P = U_C^2/R$ — мощность, потребляемая от сети при $\alpha = 0$; $\chi = \nu \cos\varphi_{(1)}$ — коэффициент мощности; $\cos\varphi_{(1)}$ — косинус угла сдвига первой гармоники входного тока относительно напряжения; ν — коэффициент искажения тока:

$$\cos\varphi_{(1)} = \frac{U_*^2}{\sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{\pi^2} + U_*^4}};$$

$$\nu = \frac{\sqrt{\frac{\sin^2\alpha}{\pi^2} + U_*^4}}{U_*};$$

U_* — относительное действующее напряжение на нагрузке.

$$U_* = \frac{U_{н.д\alpha}}{U_{н.д0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\left(1 - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)}.$$

Реактивная мощность, определяемая сдвигом по фазе первой гармоники тока,

$$Q = P \sin^2\alpha/\pi.$$

Мощность искажения, обусловленная токами высших гармоник,

$$Q_{иск} = \frac{P}{\pi}\sqrt{\pi\left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right) - \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)^2 - \sin^4\alpha}.$$

Если нагрузка преобразователя имеет активно-индуктивный характер, то форма тока в цепи не повторяет форму напряжения (рис. 37.42, *б*), так как в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует нарастанию и спаду тока. Наличие самоиндукции приводит к тому, что ток через тиристор протекает в течение некоторого времени после изменения знака питающего напряжения.

Активно-индуктивную нагрузку можно охарактеризовать фазовым углом $\varphi = \operatorname{arctg} \omega L_н/R_н$. При $\alpha > \varphi_{кр}$ ток в нагрузке прерывистый (рис. 37.42, *б*); если угол управления $\alpha \le \alpha_{кр} = \varphi$, то появление тока в одном тиристоре совпадает с исчезновением тока в другом тиристоре и ток в нагрузке непрерывный и синусоидальный, сдвиг между током и напряжением равен φ (рис. 37.42, *в*), т. е. при $\alpha < \alpha_{кр}$ возможность регулирования тока в схеме отсутствует. Однако при этом длительность управляющих импульсов должна быть больше угла сдвига фаз φ. Если это условие не выполняется, то один из тиристоров не включается и схема работает в режиме однополупериодного выпрямителя.

Закон изменения тока в схемах преобразователей переменного напряжения при *RL*-нагрузке определяется уравнением

$$i = \frac{\sqrt{2}\,U_C}{Z_н}\left[\sin(\vartheta - \varphi) - e^{\alpha - \vartheta/\omega\tau_н}\sin(\alpha - \varphi)\right],$$

где

$$Z_н = \sqrt{(\omega L_н)^2 + R_н^2};$$

$$\tau_н = L_н/R_н.$$

Угол проводимости тиристоров λ может быть найден из уравнения

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{-\lambda/\omega\tau_н}.$$

Трехфазные преобразователи переменного напряжения выполняются на основе однофазных схем (рис. 37.43).

Режим работы схемы (рис. 37.43,*а*) существенно зависит от наличия нулевого провода. В схеме с нулевым проводом токи через тиристоры во всех фазах независимы и режимы работы характеризуются уравнениями, приведенными для однофазной схемы.

В схеме рис. 37.43, *а* без нулевого провода работа всех фаз взаимосвязана и для протекания тока на-

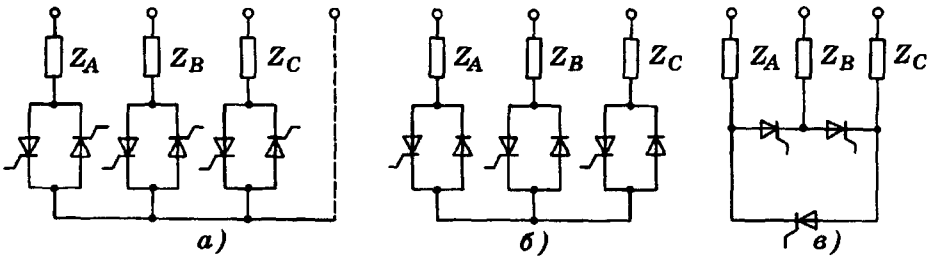


Рис. 37.43. Принципиальные схемы трехфазных преобразователей переменного напряжения

грузки необходимо открытое состояние тиристоров одновременно в двух либо трех фазах. В этом варианте тиристоры защищены от сверхтоков короткого замыкания при замыкаиии нагрузки в одной из фаз.

На рис. 37.43, *б* приведена схема с тремя тиристорами и тремя диодами При активной нагрузке для регулирования тока нагрузки от максимума до нуля фаза управляющих импульсов должна изменяться в диапазоне от 0 до 210°. При активно-индуктивной иагрузке этот диапазон умеиьшается.

Схема рис. 37 43, *в* содержит три тиристора. Полный диапазон изменения фазы управляющего напряжения от 0 до 210° (при активиой нагрузке).

37.13. УЗЛЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИИ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В преобразователях, построенных на незапираемых (одиооперационных) тиристорах, для осуществлеиия прииудительной коммутации используют специальные коммутационные узлы (КУ), в состав которых в общем случае входят: конденсаторы, играющие роль источника коммутирующего напряжения, вспомогательные (коммутирующие) тиристоры (при двухступенчатой коммутации), диоды и реакторы. В зависимости от того, как коммутирующее напряжение вводится в цепь тиристора, который необходимо запереть, и нагрузки, все многочисленные схемы КУ можно разделить на две группы: *с параллельной* и *с последовательной коммутацией.*

При *параллельной коммутации* источник КУ коммутирующего напряжения $u_к$ включается либо параллельно тиристору VT, который иеобходимо запереть, либо параллельио нагрузке (рис. 37.44, *а*, *б*). В любом из этих двух случаев иапряжение на нагрузке $u_н$ после запирания VT определяется законом измеиения $u_к$. Поскольку в качестве источиика $u_к$ обычно используется предварительно заряженный конденсатор, происходит его перезаряд током нагрузки после прекращения тока через VT. В результате кривая $u_н$ и среднее или действующее зиачение этого напряжения при параллельной коммутации оказываются зависящими от тока нагрузки.

На рис. 37.45 и 37.46 показаны схемы импульсных преобразователей постоянного напряжеиия с мгновенной коммутацией основного тиристора VT, поскольку в контуре VT —$VT_к$ —$C_к$ отсутствует реактор. Рассмотрим кратко процессы в схеме рис. 37.45. При отпирании тиристора VT коммутирующий конденсатор $C_к$, заряжеиный иа предыдущем цикле до напряжеиия E с полярностью, показанной иа рис. 37.45 знаками в скобках, перезаряжается по цепи VT—$L_э$—$VD_э$, поэтому через VT кроме тока иагрузки $i_н$, протекает полусинусоидальный импульс зарядного тока $i_э$ (рис. 37.47, *а*) Напряжение на $C_к$ изменяет знак (знаки без скобок на рис. 37.45) и становится равным $U_{C_0} \approx E$ (рис. 37.47, *б*, *в*). Через время $\Delta t_и$, равное длительности основиого импульса напряжения на иагрузке, отпирается коммутирующий тиристор $VT_к$ (момент t_1) и напряжение $u_н$ скачком возрастает на U_{C_0}

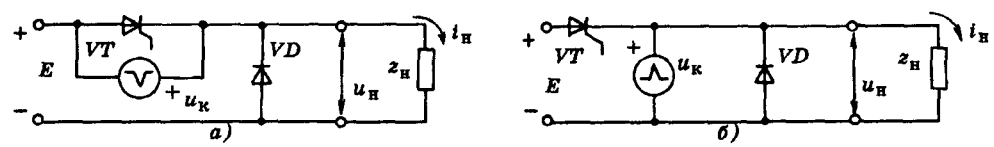


Рис. 37.44. Структурные схемы с параллельной коммутацией (на примере импульсного преобразователя постоянного напряжения)

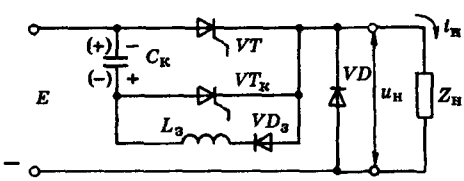


Рис. 37.45. Принципиальная схема преобразователя с параллельной мгновеиной коммутацией

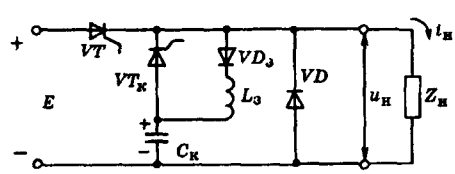


Рис. 37.46. Принципиальная схема преобразователя с линейным перезарядом конденсатора

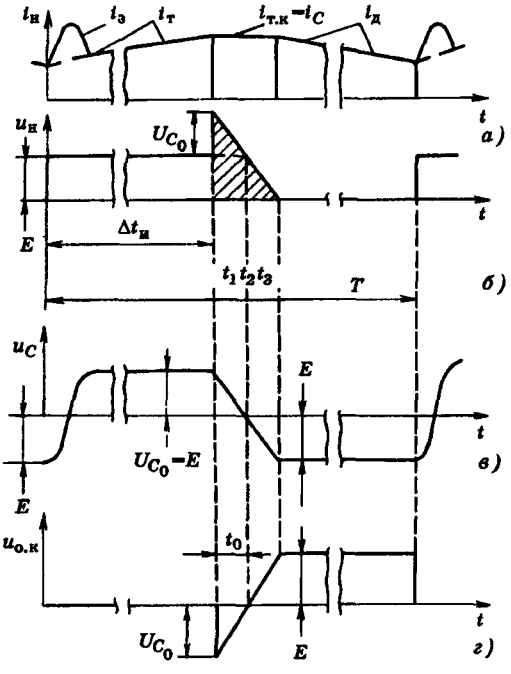


Рис. 37.47. Кривые токов и напряжений в схеме рис. 37.45

(рис. 37.47, *б*). При этом *VT* мгновенно запирается. Затем $C_к$ перезаряжается током нагрузки и, если последний на этом интервале считать неизменным ($i_н \approx I_н = \text{const}$), напряжение u_C спадает линейно. В момент $t = t_э$ $u_C = -E$ и $u_н = 0$ (рис. 37.47, *б*, *в*). После этого цикл повторяется.

При *последовательной коммутации* напряжение $u_к$ вводится последовательно в цепь тиристора *VT* (см. рис. 37.48), поэтому ток $i_н$ мгновенно переходит на шунтирующий диод *VD*, а напряжение $u_н$ сразу спадает до нуля.

На рис. 37.49 и 37.50 показаны две схемы импульсных преобразователей постоянного напряжения

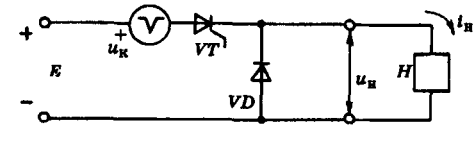


Рис. 37.48. Принципиальная схема преобразователя с последовательной коммутацией

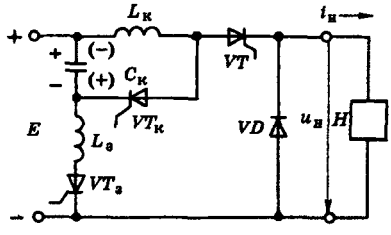


Рис. 37.49. Принципиальная схема преобразователя с последовательной коммутацией

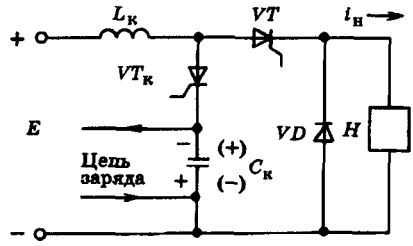


Рис. 37.50. Принципиальная схема преобразователя с последовательной двухступенчатой коммутацией

с КУ последовательного типа. В схеме рис. 37.49 $C_к$ заряжается с полярностью, показанной знаками без скобок, при отпирании зарядного тиристора $VT_э$, причем если перед этим $C_к$ не был заряжен, напряжение на нем после заряда $U_{C_0} \approx 2E$. Когда надо запереть *VT*, отпирается $VT_к$, напряжение U_{C_0} оказывается приложенным к $L_к$, напряжение на *VT* скачком снижается до $-E-U_{c0} \approx E$ и ток i_{VT} падает до нуля (рис. 37.51). При этом ток нагрузки сразу перебрасывается на *VD*, а напряжение $U_н$ становится равным нулю. Затем $C_к$ перезаряжается в контуре $C_к-L_к-VT_к$ (рис. 37.49 и 37.51) и напряжение на $C_к$ снижается. В момент t_1 $u_C = E$ и, следовательно, $u_{VT} = 0$. Поэтому интервал t_0-t_1 определяет время t_q, предоставляемое для запирания *VT*:

$$t_q = \sqrt{L_к C_к}\left[\arccos\frac{E}{\sqrt{U_{C_0}^2+(\rho I_н)^2}} - \arccos\frac{U_{C_0}}{\sqrt{U_{C_0}^2+(\rho I_н)^2}}\right].$$

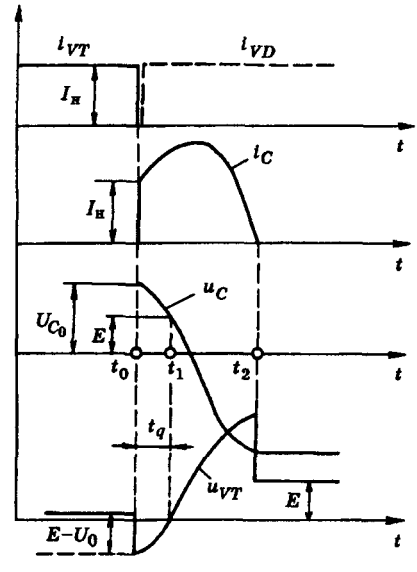


Рис. 37.51. Кривые токов и напряжений в схеме рис. 37.49

Затем полярность u_C изменяется на обратную (знаки в скобках на рис. 37.50), и в момент t_2, когда i_C спадает к нулю, напряжение на $C_к$ равно

$$u_C\,(t=t_2) = U_{C_2} = -\sqrt{U_{C_0}^2+(\rho I_н)^2}\ .$$

Таким образом, $|U_{C_2}| > U_{C_0}$, что означает наличие эффекта накопления энергии, обусловленного переходом энергии из $L_к$ в $C_к$. Максимальное прямое напряжение на VT равно $E+\sqrt{U_{C_0}^2+(\rho I_н)^2}$, затем при $t>t_2$ скачком спадает до E.

Если перезаряд $C_к$ произвести снова через $L_з$–$VT_з$ от источника E, то будем иметь новое значение $U'_{C_0} = E+\sqrt{U_{C_0}^2+(\rho I_н)^2}$, еще более увеличится зиачение U_{C_2} и т. д.

Схожие процессы имеют место в схеме рис. 37.50 (на которой цепь первоначального заряда $C_к$ не показана). Здесь в принципе может быть $U_{C_0} \le E$, однако

$$U_{C_2} = -\sqrt{(E+U_{C_0})^2+(\rho I_н)^2}\ .$$

Сильное проявление эффекта накопления энергии в КУ с последовательной коммутацией требует обязательного применения устройств "сброса" (отвода) энергии, обычно осуществляемых в виде добавочной обмотки на $L_к$ с соответствующим числом витков, подключенной через диоды к источнику питания E.

37.14. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ТОКА

Автономным (или независимым) инвертором (АИ) называется преобразователь постоянного напряжения в переменное, в приемной сети которого нет источников энергии той же частоты.

Основой любого АИ является вентильный коммутатор (ВК), т. е. совокупность управляемых и в общем случае неуправляемых вентилей, соединенных по определенной схеме (одно- или трехфазной нулевой или мостовой и т. д.) и осуществляющих переключение между выводами источника питания постоянного напряжения (тока) и нагрузки в определенной последовательности и с заданной частотой.

Преобразование постоянного напряжения в переменное осуществляется с использованием всех типов силовых полупроводниковых ключей. В области больших мощностей наиболее эффективные преобразователи выполняются на обычных тиристорах, при этом их стоимость минимальна, а схемотехника силовых цепей и цепей управления проста. В последние годы успешно распространяются в область средних и больших мощностей инверторы на IGBT — биполярных транзисторах с изолированным управляющим электродом. Несмотря на более высокую стоимость, они предоставляют разработчику богатые возможности формирования и регулирования выходного напряжения и тока. Как со стороны нагрузки, так и со стороны источника питания в общем случае включаются LC-цепи, служащие для согласования источника и нагрузки, для обеспечения условий коммутации вентилей и для фильтрации выходного переменного и (или) входного постоянного напряжения или тока.

В зависимости от типа этих четырехполюсников и используемых вентилей автономные инверторы можно разделить на три большие группы: 1) инверторы тока (АИТ); 2) инверторы напряжения (АИН); 3) резонансные инверторы (АИР).

Типовая схема АИТ показана на рис. 37.52, *а* (на примере включения тиристоров по однофазной мостовой схеме). Основными особенностями такого инвертора являются:

а) непрерывный входной ток i_d (рис. 37.52, *б*). На практике это условие выполняется за счет включения на входе инвертора индуктивности L_d, создающей во входной цепи режим источника тока по переменной составляющей;

б) емкостный характер цепи нагрузки инвертора, необходимый для принудительной коммутации вентилей. В зависимости от способа подключения коммутирующих конденсаторов (рис. 37.52) инверторы называют *параллельными*, *последовательными*, *последовательно-параллельными* и т. д.;

в) возможность в силу особенности (см. п. "б") использования обычных незапираемых тиристоров, которые образуют вентильный коммутатор *ВК* (рис. 37.52, *а*). При параллельном конденсаторе тиристоры *ВК* практически мгновенно переключают входной ток i_d, поэтому выходной ток *ВК* $i_н$ имеет форму знакопеременных импульсов (рис. 37.52, *в*).

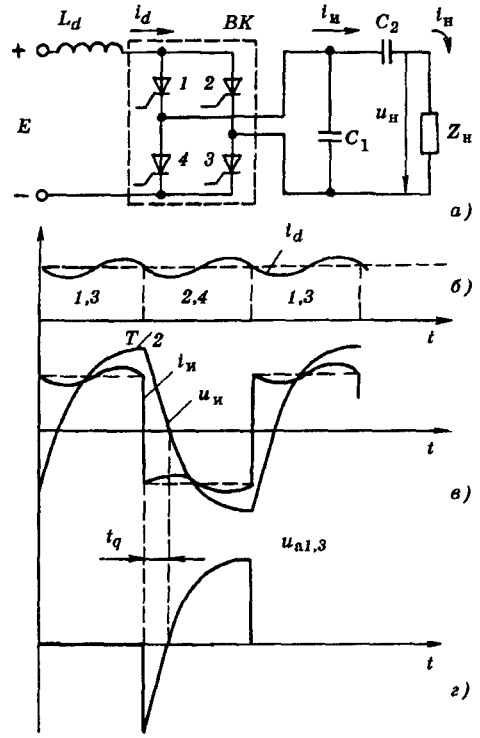


Рис. 37.52. Схема однофазного мостового инвертора тока (*а*) и диаграммы токов и напряжений, иллюстрирующие его работу (*б*, *в* и *г*)

При этом напряжение на нагрузке $u_н$ зависит от схемы ее замещения и соотношения параметров, емкости конденсаторов в цепи нагрузки и способа их включения, рабочей частоты. В случае параллельного АИТ кривая этого напряжения оказывается более сглаженной, чем кривая тока $i_и$. В любом случае момент перехода кривой выходного напряжения *ВК* через нуль должен отставать от момента перехода через нуль выходного тока $i_и$, что необходимо для обеспечения в кривой напряжения на тиристорах $u_а$ сразу после коммутации импульса обратного напряжения (рис. 37.52, *г*) в течение времени t_q, требуемого для восстановления управляемости тиристоров.

Таким образом, конденсатор в схеме параллельного АИТ играет роль одновременно сглаживающего (поскольку через него замыкаются высшие гармоники тока) и компенсирующего (поскольку он генерирует реактивную мощность, потребляемую активно-индуктивной нагрузкой). В схеме последовательного АИТ, которая используется реже, вторая из указанных функций отсутствует.

К числу достоинств АИТ относятся: простота, так как возможно использование обычных незапираемых тиристоров без каких-либо коммутационных узлов, и сравнительно хорошая форма кривой выходного напряжения при наличии на выходе параллельного конденсатора. Основными недостатками АИТ являются падающая внешняя характеристика (см. ниже) и зависимость величины и формы кривой выходного напряжения от частоты, в связи с чем обычно АИТ используют при стабильной рабочей частоте в диапазоне от 50 до 1000 Гц.

На рис. 37.53, *а* показана трехфазная мостовая схема АИТ. Номера тиристоров соответствуют очередности их вступления в работу (рис. 37.53,*б*). Каждый тиристор открыт в течение интервала $2\pi/3$, так как при отпирании следующего тиристора той же группы (анодной или катодной) ранее проводивший тиристор запирается за счет напряжения на соответствующем коммутирующем конденсаторе. При этом ток одновременно проходит через два тиристора — один в анодной и один в катодной группе, например *1* и *6*, затем *1* и *2*, *2* и *3* и т. д.

Кратность частоты гармоник, содержащихся в кривой напряжения на нагрузке АИТ, определяется выражением

$$n = f_2/f = km \pm 1,$$

где f — рабочая частота, определяемая частотой импульсов управления на каждом из тиристоров; m — фазность схемы, т. е. число неодновременно вступающих в работу тиристоров на периоде частоты f, $k = 1, 2, 3...$

Для расчета характеристик АИТ часто используется метод основной гармоники, согласно которому вентильный коммутатор вместе с цепью источника питания заменяется генератором синусоидального тока. В случае, когда непосредственно к выходным выводам *ВК* подключен конденсатор (т. е. параллельный, последовательно-параллельный или параллельно-последовательный инвертор), выходной ток *ВК* $i_и$ имеет характер прямоугольных импульсов (в предположении, что ток i_d идеально сглажен: $i_d = I_d$). При этом действующее значение синусоидального тока эквивалентного генератора или, что то же, действующее значение основной гармоники тока $i_и$ равно: в случае однофазных АИТ (см. рис. 37.52, *а*)

$$I_и = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d;$$

в случае трехфазного мостового АИТ (рис. 37.53, *а*), у которого ток $i_и$ состоит из прямоугольных разнополярных импульсов длительностью $2\pi/3$, разделенных паузами $\theta = \pi/3$,

$$I_и = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos\frac{\theta}{2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d.$$

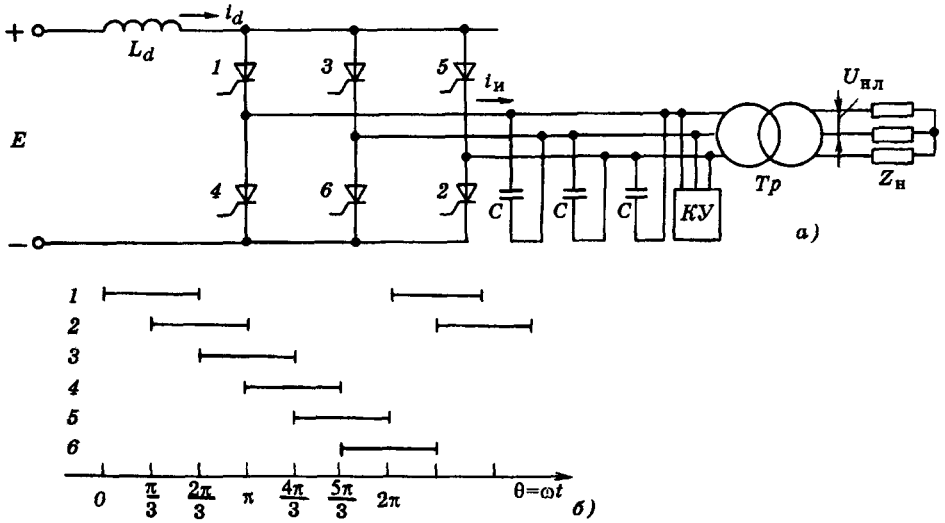


Рис. 37.53. Схема трехфазного мостового параллельного инвертора (*а*) и диаграмма интервалов открытого состояния тиристоров *1*, *2*, ..., *6* (*б*)

Действующее значение напряжения на нагрузке параллельного АИТ связано с напряжением питания соотношением

$$U_н = n_{тр}E/(a_{сх}\cos\beta),$$

где $n_{тр} = w_2/w_1$ — коэффициент трансформации трансформатора; $a_{сх}$ — коэффициент, зависящий от схемы инвертора: для однофазных схем $a_{сх} = 2\sqrt{2}/\pi = 0{,}9$, для трехфазной мостовой схемы $a_{сх} = 2{,}34$, при этом под $U_н$ следует понимать фазное напряжение; β — угол, на который основная гармоника тока $i_н$ опережает основную гармонику $u_п$ и который, таким образом, определяет время, предоставляемое для восстановления управляемости тиристоров. При работе инвертора этот угол должен быть не меньше критического угла β_{min}, соответствующего (с запасом в 1,3—1,5 раза) паспортному времени выключения тиристоров t_q при наивысшей рабочей частоте f_{max}:

$$\beta \geq \beta_{min} = (1{,}3+1{,}5)360^\circ f_{max}t_q.$$

Внешние характеристики параллельного АИТ, построенные по полученному методом основной гармоники соотношению

$$\frac{a_{сх}U_н}{n_{тр}E} = \frac{1}{\cos\beta} = \sqrt{1+\left(\frac{1-B\sin\varphi_н}{B\cos\varphi_н}\right)^2}$$

показаны на рис. 37.54 для различных значений $\cos\varphi_н$. В этом соотношении величина $B = n_{тр}^2/\omega C z_н$ — отношение приведенной к вентильной стороне трансформатора проводнмости нагрузки к проводимости коммутирующего конденсатора, называемое часто степенью нагрузки инвертора. По оси абсцисс на рис. 37.54 отложена степень активной нагрузки $B_а = B\cos\varphi_н$, где $\varphi_н = \operatorname{arctg}\omega L_н/R_н$.

Величина $a_{сх}U_н/n_{тр}E$, стоящая в левой части последнего соотношения и отложенная по оси ординат на рис. 37.54, является относительным выходным напряжением инвертора (с учетом коэффициента $a_{сх}$). Из связи этой величины с углом β следует, что точки внешних характеристик на рис. 37.54, расположенные ниже прямой $\frac{a_{сх}U_н}{k_{тр}E} = \frac{1}{\cos\beta_{min}}$, недопустимы из-за нарушения коммутационной устойчивости инвертора.

Выбрав положение рабочей точки на семействе внешних характеристик, определяем по заданным $U_н$, E и $a_{сх}$ значение $n_{тр}$ и по значению $B_а$ и известным параметрам нагрузки $z_н$, $\cos\varphi_н$ находим необходимую емкость конденсатора. Последнюю можно также найти непосредственно по соотношению

$$C = \frac{n_{тр}}{\omega z_н}\left(\operatorname{tg}\beta\cos\varphi_н + \sin\varphi_н\right).$$

На рис. 37.55 показаны характеристики выходного тока параллельного инвертора в относительных единицах при различных $\cos\varphi_н$, т. е. зависимости отношения входной проводимости инвертора I_d/E к проводимости конденсатора (с учетом коэффициента схемы $a_{сх}$ и в расчете на одну фазу от степени нагрузки):

$$\frac{a_{сх}^2 I_d}{mE\omega C} = B\cos\varphi_н\left[1+\left(\frac{1-B\sin\varphi_н}{B\cos\varphi_н}\right)^2\right].$$

Индуктивность дросселя L_d в цепи постоянного тока обычно выбирают из условия непрерывности тока. Для трехфазной мостовой схемы при $\beta<\pi/6$

$$L_d \geq \frac{E[1-\cos(\beta+\pi/6)]}{72fI_d\cos\beta}$$

и при $\beta\geq\pi/6$

$$L_d \geq \frac{E\operatorname{tg}\beta}{72fI_d}.$$

В эти соотношения следует подставлять минимально возможные значения тока I_d.

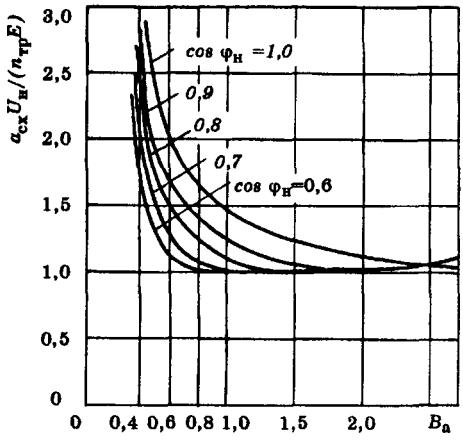


Рис. 37.54. Внешние характеристики параллельного инвертора тока

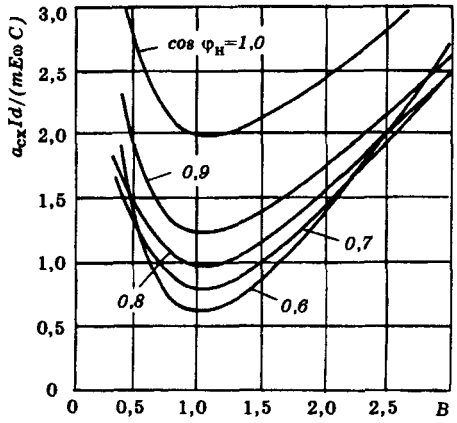


Рис. 37.55. Входные характеристики параллельного инвертора тока

Резкий подъем выходного напряжения (см. рис. 37.54) и обусловленный этим рост входного тока (рис. 37.55) при малых B_a или B, т. е. в режимах, близких к холостому ходу, является существенным недостатком параллельного инвертора, так как на практике обычно требуется иметь напряжение, не зависящее от параметров нагрузки, а рост входного тока приводит к увеличению потерь в элементах схемы.

При питании инвертора от источника с регулируемым выходным напряжением, например управляемого выпрямителя, стабилизация или изменение по определенному закону напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет соответствующего регулирования этого источника.

Однако в ряде случаев регулировать напряжение питания нельзя, например при питании инвертора от аккумуляторной батареи. В этом случае стабилизация или регулирование напряжения инвертора осуществляется внутренними средствами. Зависимость выходного напряжения от угла β означает, что, изменяя угол β, можно обеспечить изменение напряжения на нагрузке. Угол β можно регулировать, изменяя соотношение между активной и реактивной составляющими тока, потребляемого от инвертора. Это достигается чаще всего с помощью компенсирующего устройства (КУ), подключенного к выходу инвертора (рис. 37.56). На рис. 37.56 показано так называемое индуктивно-тиристорное КУ, которое состоит из реакторов, подключаемых через встречно-параллельные тиристоры к выходу инвертора. Действие такого устройства заключается в компенсации возникающего при разгрузке инвертора избытка реактивной мощности. Изменение реактивной мощности, потребляемой КУ, осуществляется изменением фазы управляющих импульсов тиристоров КУ $\alpha_к$ относительно фазы переменного напряжения на выходе инвертора. Цепь из двух

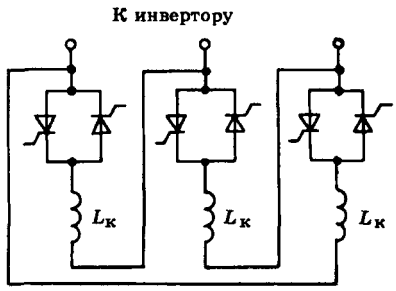


Рис. 37.56. Схема трехфазного индуктивно-тиристорного компенсирующего устройства

встречно-параллельных тиристоров и дросселя $L_к$ можно по основной гармонике рассматривать как переменную индуктивность $L_э$, которая зависит от угла $\alpha_к$,

$$L_э = \frac{\pi L_к}{\pi - 2\alpha_к - \sin 2\alpha_к}.$$

В этом случае относительное выходное напряжение инвертора и угол β связаны со степенью нагрузки B, коэффициентом мощности нагрузки $\cos\beta_н$ и параметром $D = 1/\omega^2 C L_э$ соотношением

$$\frac{a_{сх} U_н}{n_{тр} E} = \frac{1}{\cos\beta}\sqrt{1 + \left(\frac{1 - B\sin\varphi_н - D}{B\cos\varphi_н}\right)^2}.$$

В частотно-регулируемом электроприводе переменного тока используются модифицированные схемы АИТ: с отсекающими диодами (рис. 37.57, *а*) или с непрямой (двухступенчатой) коммутацией (рис. 37.57,*б*). В первой из них конденсаторы разделены на две группы, которые отделены от нагрузки (асинхронный двигатель *АД*) диодами *VD1* —

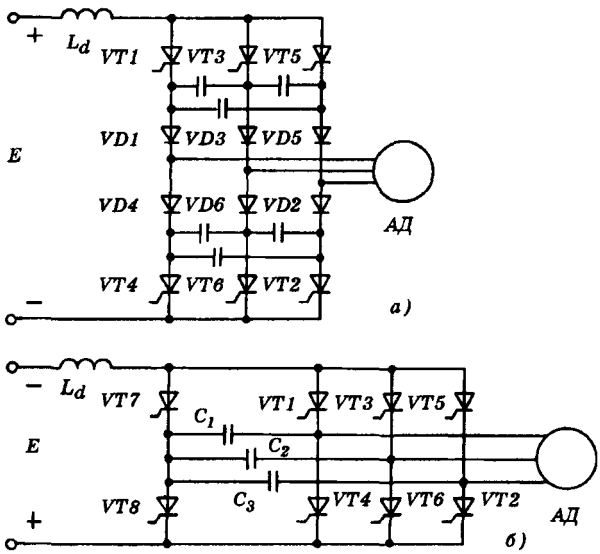


Рис. 37.57. Схема трехфазного мостового инвертора тока с отсекающими диодами (*а*) и с непрямой коммутацией (*б*) при работе на асинхронный двигатель *АД*

VD6, препятствующими разряду конденсаторов на нагрузку. Поэтому такой инвертор может работать при изменяемой в определенном диапазоне частоте и, в частности, при низких частотах (начиная с единиц герц).

В инверторе по рис. 37.57, *б* введены коммутирующие тиристоры *VT7*, *VT8*, работающие попеременно с утроенной частотой. При отпирании, например, *VT7* осуществляется запирание проводившего ранее тиристора анодной группы *VT1*, *VT3* или *VT5*; после перезаряда соответствующего конденсатора C_1, C_2 или C_3 отпирается следующий по порядку работы основной тиристор этой группы. Аналогично происходит коммутация в катодной группе: например, с *VT2* на *VT6* и затем с *VT6* на *VT4*. Такая двухступенчатая коммутация также позволяет уменьшить зависимость выходного напряжения от параметров нагрузки (например, от значения потребляемого *АД* тока) и от рабочей частоты. Однако в этой схеме, как и в инверторе по рис. 37.57, *а*, при перегрузке по току возможно возникновение перенапряжений на конденсаторах и на тиристорах, в связи с чем необходимы специальные ограничители напряжения.

37.15. АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ. ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Простейший однофазный инвертор напряжения (рис. 37.58, *а*) формирует на нагрузке напряжение $U_н$ прямоугольной формы (рис. 37.58, *б*), а кривая тока в нагрузке $i_н$ зависит от характера нагрузки и ее параметров. В каждом плече моста показан запираемый (двухоперационный) тиристор. В последние годы при мощности до сотен киловатт все чаще используются IGBT и другие виды силовых управляемых ключей.

В случае активно-индуктивной нагрузки ток $i_н$ имеет форму, показанную на рис. 37.58, *б*, и его первая гармоника отстает по фазе от напряжения. Поэтому необходимо обеспечить путь для протекания тока на тех интервалах времени, на которых знаки тока и напряжения противоположны; для этого служат обратные диоды *1'—4'*. Так как ток в активно-индуктивной нагрузке не может изменяться скачком, то после запирания тиристоров *1* и *3* он продолжает протекать в том же направлении через диоды *2'* и *4'* и источник. После перехода кривой тока $i_н$ через нуль он переходит с диодов на тиристоры *2* и *4*, причем в цепи источника питания ток $i_{вх}$ также изменяет знак (рис. 37.58, *в*).

Таким образом, характерными особенностями автономных инверторов напряжения (АИН) являются:

а) питание от источника напряжения, в связи с чем входное напряжение можно считать неизменным. Для придания реальным источникам свойств источника напряжения практически всегда вход инвертора шунтируют конденсатором *С* достаточно большой емкости (который является обязательным в случае таких источников, как электромашинный генератор постоянного тока или выпрямитель, и желательным даже в случае питания АИН от аккумуляторной батареи);

б) импульсный характер выходного напряжения; в связи с этим АИН не может работать на нагрузку, шунтированную емкостью. При необходимости сглаживания $u_н$ последовательно должна быть включена разделяющая индуктивность.

Достоинствами АИН являются: жесткая внешняя характеристика, независимость формы кривой выходного напряжения от параметров нагрузки, возможность работы при переменной частоте и, в частности, при низких и сверхнизких частотах (единицы и доли герца).

Однофазная мостовая схема (см. рис. 37.58) содержит четыре ключа с полной управляемостью и состояниями *S1—S4*. Логика управления должна в каждый момент обеспечить замкнутое состояние двух ключей, которые однозначно определяют один из трех уровней выходного напряжения $U_н$ (табл. 37.24).

Состояния ключей, замыкающих источник питания (*S1* = *S4* = 1 или *S2* = *S3* = 1), запрещены.

Формирование и импульсное регулирование осуществляют путем изменения интервалов существования различных уровней выходного напряжения. Формируется постоянный интервал, в пределах которого сменяют друг друга два интервала T_+ и T_0

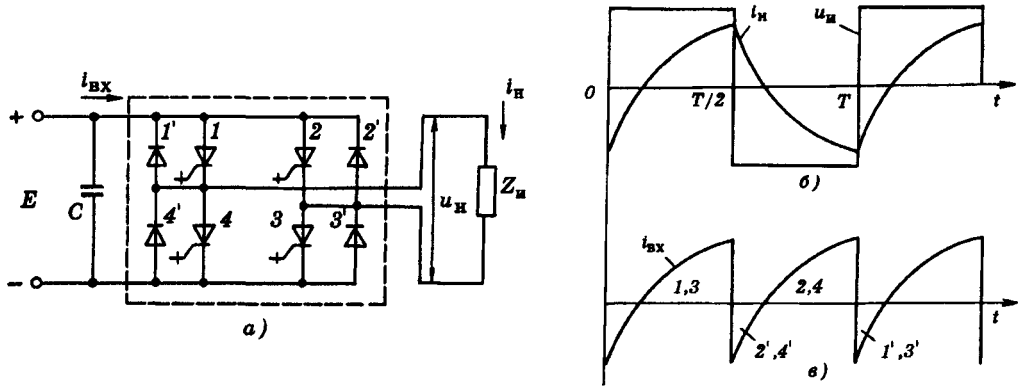


Рис. 37.58. Схема однофазного мостового инвертора напряжения (*а*) и диаграммы, поясняющие ее работу (*б* и *в*)

Таблица 37.24. Состояние ключей АИН

Состояние схемы	Интервал существования	Состояние ключей	Выходное напряжение
C_+	T_+	$S1=S3=1$ $S2=S4=0$	$U_н=E$
C_-	T_-	$S2=S4=0$ $S1=S3=1$	$U_н=-E$
C_0	T_0	$S1=S2=1$ $S3=S4=0$ или $S1=S2=0$ $S3=S4=1$	$U_н=0$

или T_+ и T_- с состояниями, соответственно C_+, C_0 или C_+, C_-. При изменении соотношения T_+/T_0 или T_+/T_- модулируется среднее напряжение на выходе схемы.

В преобразователе с трехфазным выходом минимальное количество управляемых ключей шесть (рис. 37.59, *а*). Логика работы ключей: в каждой фазе обязательно должен быть замкнут один и только один из ключей в каждой паре: *S1* или *S4*, *S3* или *S6*, *S5* или *S2*. Среднее значение потенциала фазы определяется коэффициентом заполнения — относительным временем замкнутого состояния четного и нечетного ключей.

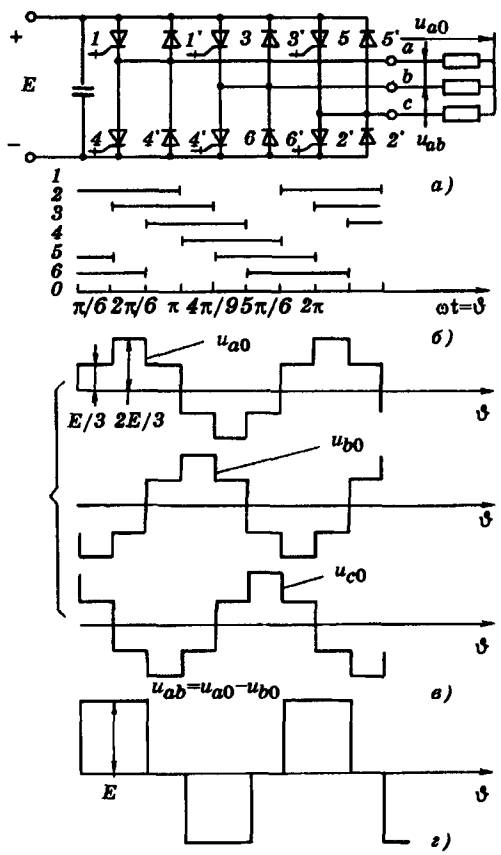


Рис. 37.59. Схема трехфазного мостового инвертора напряжения (*а*), интервалы открытого состояния тиристоров 1, 2, ..., 6 (*б*), кривые фазных (*в*) и линейного (*г*) напряжений

В том случае, когда длительность открытого состояния каждого управляемого вентиля равна π (и, следовательно, в открытом состоянии всегда находятся три тиристора), кривые фазных u_{a0}, u_{b0} и u_{c0} и линейного (например, u_{ab}) напряжений имеют вид, показанный на рис. 37.59, *в* и *г*. При этом гармонический состав выходного линейного напряжения определяется следующим соотношением:

$$u_{н.л}=\frac{2\sqrt{3}}{\pi}E\sum_{n=km\pm1}\frac{\sin n\vartheta}{n},$$

где $k=0, 1, 2, 3...$; $m=6$; n — номер гармоники, присутствующей в выходном напряжении.

В выходном напряжении трехфазного мостового инвертора отсутствуют гармоники, кратные трем. Из приведенного соотношения видно, что относительное значение 5-й гармоники равно 20 % основной, 7-й — 14,3 %, 11-й — 9 %, 13-й — 7,7 % и т. д.

Трехфазный АИН может быть также составлен из трех однофазных мостовых с тремя отдельными трансформаторами (рис. 37.60). Вторичные обмотки трансформаторов должны быть соединены в звезду, при этом гармоники, кратные трем, имеющиеся в напряжении однофазных инверторов, в кривой результирующего напряжения на нагрузке будут отсутствовать.

При практическом использовании АИН часто возникает необходимость регулировать амплитуды первой гармоники выходного напряжения $U_{в(1)}$ при неизменном напряжении питания E или стабилизировать $U_{в(1)}$ при изменяющемся E. Обычно при этом также требуется, чтобы гармонический состав напряжения (т. е. содержание высших гармоник) значительно не ухудшался.

Регулирование (или стабилизация) напряжения на нагрузке внутренними средствами (т. е. при отсутствии воздействия на напряжение питания) в инверторах напряжения возможно за счет изменения длительности импульсов, образующих кривую этого напряжения. При этом возможны следующие методы формирования кривой выходного напряжения и его регулирования (на примере однофазного мостового инвертора рис. 37.58, *а*):

1. *Широтное регулирование* (или регулирование по длительности) с однократным включением каждого тиристора в течение периода выходной частоты (рис. 37.61). Изменение напряжения осуществляется за счет изменения паузы θ между импульсами длительностью λ, образующими кривую выходного напряжения. Действующее значение выходного напряжения $U_н=E\sqrt{2\lambda/T}$. Гармонический состав кривой $u_н$ определяется соотношением

$$u_н=\frac{4E}{\pi}\sum_{k=0,1,2...}^{\infty}\frac{\sin(2k+1)\vartheta}{2k+1}\cos(2k+1)\frac{\theta}{2}.$$

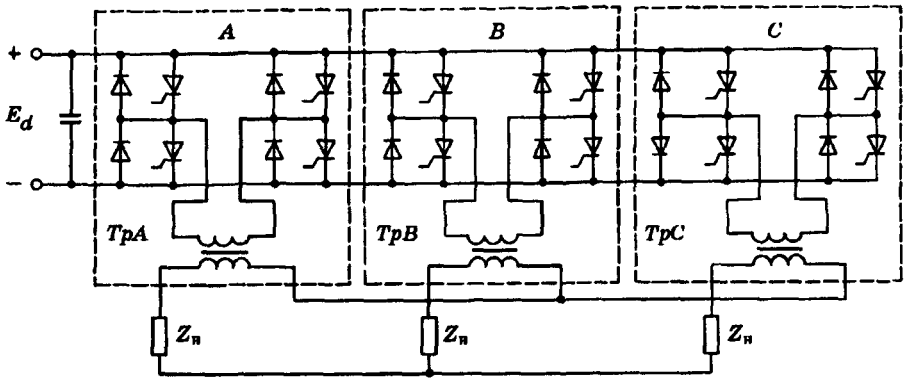


Рис. 37.60. Трехфазный инвертор напряжения, составленный из трех однофазных мостовых

Этот способ можно реализовать, оставив длительность открытого состояния каждого тиристора равной π и сдвинув моменты переключения тиристоров полумоста *1*, *4* относительно моментов переключения тиристоров полумоста *2*, *3* на угол θ (рис. 37.61, *б*). Этот достаточно простой способ регулирования связан однако с измененнем содержания относительно низкочастотных гармоник в кривой выходного напряження прн регулированин длительности импульсов (рис. 37.62), что затрудняет фильтрацню гармоннк и приводит к иеобходимости использовать громоздкие выходные фильтры.

2. *Широтно-импульсное регулирование (ШИР)*, при котором выходное напряженне АИН формируется иа каждом полупериоде из нескольких импульсов одинаковой длительности, разделенных паузами θ (рис. 37.63). Изменяя длительность этих импульсов, формируемых с помощью соответствующего алгоритма управления вентилями, прн сохранении постоянной их частоты следования $f_к$ в течение каждого полупериода, можно обеспечить изменение напряжения на нагрузке от максимального, когда $\theta = 0$, до минимального (при $\lambda = \lambda_{min}$) значения. При таком импульсном регулировании в крнвой выходного напряжения изменяется а основном содержание относительно высокочастотных гармоник, обусловленных частотой следования импульсов $f_к$,

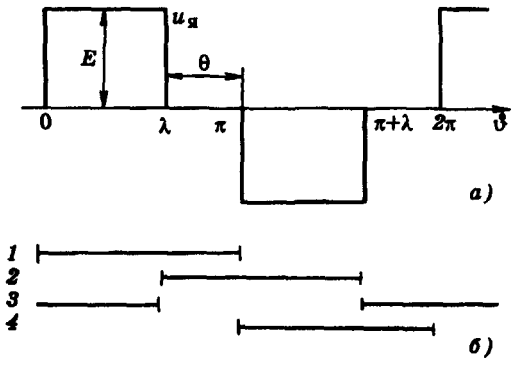


Рис. 37.61. Кривая выходного напряжения АИН при широтном регулировании (*а*) и интервалы открытого состояния управляемых вентилей (*б*) в схеме рис. 37.60, *а*

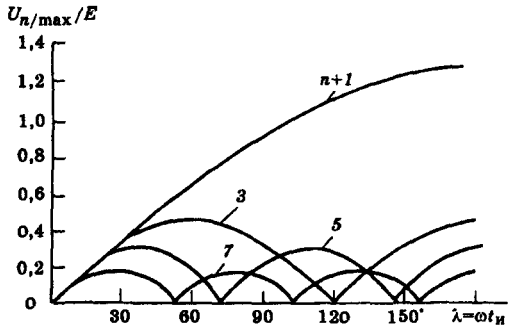


Рис. 37.62. Изменение гармонического состава выходного напряжения однофазного инвертора при широтном регулированнн. Цифры у кривых — номера гармоник

но так как эта частота высока, гармоникн могут быть легко сглажены. В то же время соотношение низкочастотных гармоник, обусловленных прямоугольной формой огибающей "пакета импульсов" за полпериода выходной частоты инвертора, остается неизменным во всем днапазоне регулирования.

3. *Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)* (рнс. 37.64). Этот способ основан на непрерывном изменении (модуляции) по синусоидальному или близкому к нему (трапецеидальному, треугольному) закону длительностн высокочастотных импульсов несущей частоты $F_н$, образующих кривую выходного напряження инвертора.

При модуляции одного из фронтов получаем одностороннюю ШИМ, а обоих фронтов — двусторон-

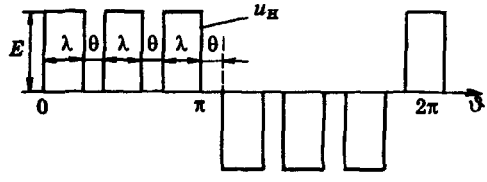


Рис. 37.63. Кривая выходного напряжения однофазного инвертора при широтно-импульсном регулировании действующего значения или значения первой гармоники

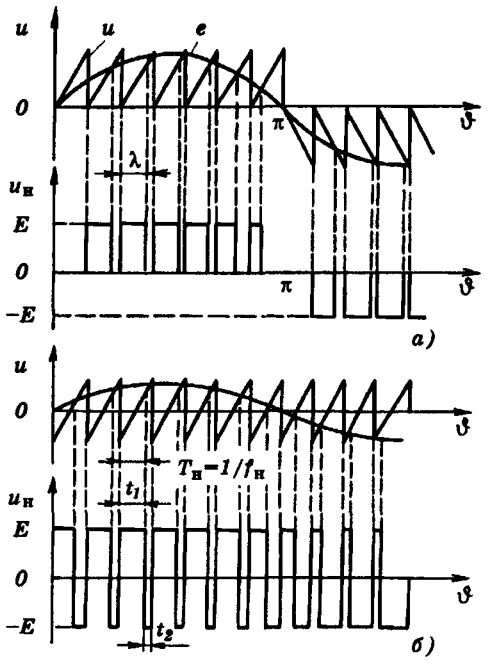


Рис. 37.64. Формирование выходного напряжения АИН методом широтно-импульсной модуляции

а — однополярная ШИМ; *б* — двухполярная ШИМ

нюю ШИМ. Модуляция может быть или однополярной (рис. 37.64, *а*), или двуполярной (рнс. 37.64, *б*). В первом случае в течение полупернода выходной частоты инвертора f нмпульсы нмеют одну полярность, во втором — выходное напряжение инвертора образовано импульсамн чередующейся полярности и на каждом полупернодe выходного напряжения импульсы соответствующей полярности нмеют большую длительность.

При однополярной модуляции наибольшее значение выходного напряжения получается при изменении длительностн импульса $f_и$ от нуля до нанбольшей возможной, которая в пределе равна перноду частоты следования импульсов $T_н = 1/f_н$. При двуполярной модуляцин сумма длительностн положительного и отрицательного нмпульсов $t_1 + t_2$ всегда равна $T_н = 1/f_н$, поэтому измененне выходного напряжения инвертора получается прн измененнн длнтельности импульсов каждой полярности от нуля до максимально возможной t_1 или $t_2 \to T_к$.

Обычно периоды несущей частоты выбирают одинаковыми для всех фаз, а их фазы — совпадающими. Закон модуляции должен обеспечивать получение заданной амплитуды основной гармоники модулирующей частоты.

Получили распространенне аналого-импульсный и цифровой способы модуляцнн.

Аналого-импульсный основан на сравнении линейно изменяющегося снгнала несущей частоты и гармонического сигнала с частотой модуляцин. Способ сравнительно просто реализуется (рнс. 37.65). Источнник модулирующего сигнала *ИМС*, регулируемый по частоте н напряжению U_f и U_u, связан с одной группой входов компараторов K_A, K_B, K_C, а на другие входы компараторов подается развертывающий сигнал $U_р$ несущей частоты от источника линейно изменяющегося сигнала *ИРС*. Логические снгналы с выходов компараторов (U_{S1}, U_{S3} и U_{S5}) и нверсин этих сигналов (U_{S4}, U_{S6}, U_{S2}) используются для управления состоянием ключей $S1$—$S6$.

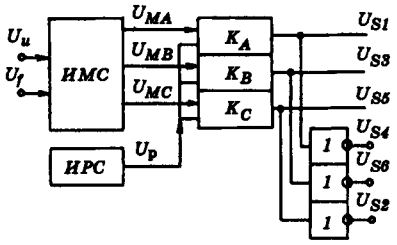


Рис. 37.65. Функциональная схема системы упраалення с ШИМ

Цнфровой способ модуляцни основан на подсчете чнсла импульсов высокой тактовой частоты $F_т >> F_н$ и формированни требуемых интервалов:

для периода несущей частоты

$$N_н = T_н/T_т;$$

для нитервалов T_+ и T_-

$$N_+ = T_+/T_т, \quad N_- = T_-/T_т.$$

Процесс ШИМ сводится к считыванию заранее рассчнтанных чисел нз массива T_+ для фаз A, B и C и формнрованию соответствующих интервалов счетчикамн-таймерами.

Наиболее просты преобразователи с незмеиными выходной частотой и напряжением, применяемые в качестве нсточнников электропнтания. Основные требования к нним — получение хорошего гармонического состава напряжения. При формировании напряження методом ШИМ в спектре выходного напряжения присутствуют следующие гармонические составляющне: полезная составляющая с частотой модуляцин $f_м$; канонические составляющне несущей частоты (кратные ей гармоннки) $(2k+1)f_н$, $k = 0, 1, 2...$; комбннационные составляющие $(2k+1)f_н \pm lf_м$, $l = 1, 2, 3...$

Если справедливо $f_н >> f_м$ н модулирующий сигнал не содержит канонических составляющнх частоты модуляцин, из выходного напряжения сравнительно просто выделяется полезная модулирующая составляющая путем подавлення частоты несущей н ее гармоник.

4. *Импульсное слежение.* Один из возможных способов воспронзведения модулирующего снгнала получнл названне нмпульсного слежения (ИС). Способ может быть пояснен функциональной схемой рис. 37.6б, *а*. Выходное напряженне U_2 изменяется на U_1 в результате каждой коммутацин пары комплементарных ключей $S1$ н $S2$. Разность напряжений U_2 и заданного напряжения слежения $U_{сл}$

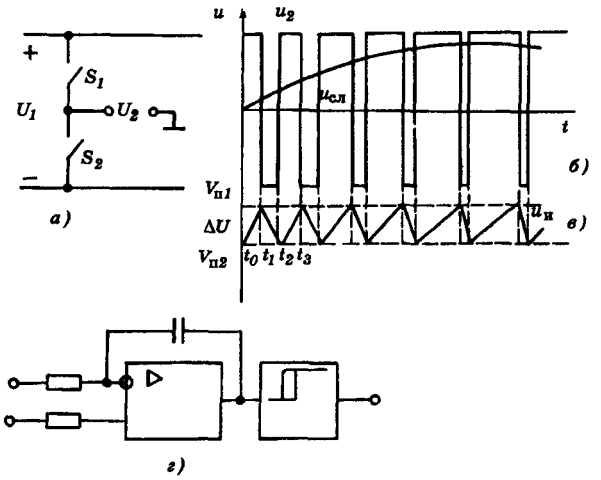


Рис. 37.66. АИН с импульсным слежением

а — формирование выходного напряжения; *б, в* — принцип интегрального слежения; *г* — система управления

интегрируется $u_и$ и сравнивается с уровнями $U_{п1}$ и $U_{п2}$, отстоящими друг от друга на ΔU — некоторую константу, которая существенно влияет на характер формирования U_2. Поскольку

$$\frac{1}{T_и}\int_{t_0}^{t_1}(u_2-u_{сл})dt = \frac{1}{T_и}\int_{t_1}^{t_2}(-U_2-U_{сл})dt = \Delta U,$$

среднее значение U_2 между моментами переключения одного знака равно среднему значению модулирующего сигнала $U_{сл}$ на этом же интервале (рис. 37.66, *г*). Таким образом, U_2 воспроизводит своей низкочастотной составляющей модулирующий сигнал $U_{сл}$. Из принципа действия следует, что средняя частота переключений зависит от ΔU: чем ближе пороги переключения и меньше ΔU, тем выше средняя частота переключений.

Строго говоря, напряжение на выходе U_2 может не иметь постоянного периода, поэтому спектральный состав его сложен, он содержит больше низкочастотных составляющих, чем соответствующий выходной сигнал ШИМ. Однако среднее число коммутации при ИС меньше, соответственно меньше и динамические потери мощности.

Функции коммутаторов на основе силовых ключей непрерывно расширяются. Они не сводятся к выпрямлению переменного напряжения или инвертированию постоянного. Наиболее интенсивно развиваются преобразователи, выполняющие следующие операции:

управление многоканальными силовыми коммутаторами;

формирование токов для компенсаторов неактивной мощности;

формирование искусственных (регулируемых) внешних характеристик источников и, в частности, формирование токов для электротехнологических установок;

Как правило, выполняющие эти функции импульсные преобразователи входят составной частью в замкнутые системы, содержащие датчики регулируемых параметров, регуляторы, исполнительные органы. В последние годы в таких системах широко применяются цифровые методы обработки информации и микроконтроллеры для их реализации. Ниже приведены примеры применения некоторых импульсных преобразователей электрической энергии и регулирующих устройств.

Управление шаговыми двигателями и вентильно-индукторными двигателями. Задача управления — создание многоканальной (по числу фаз статора) последовательности униполярных импульсов тока. Порядок следования импульсов определяет направление вращения ротора, ток статорной обмотки управляет развиваемым моментом. Вентильно-индукторные двигатели в последние годы характеризуются заметным расширением диапазона мощностей (известны разработки систем привода на десятки и сотни киловатт), поэтому силовые схемы коммутаторов для них представляют собой импульсные регулируемые устройства для преобразования и регулирования электрической энергии.

Возбуждение полюсов производят с помощью схемы коммутатора, один из вариантов которой для четырех фаз приведен на рис. 37.67. Каждый из ключей S представляет собой силовой вентиль, шунтированный диодом. Замыкание ключей S_1 и

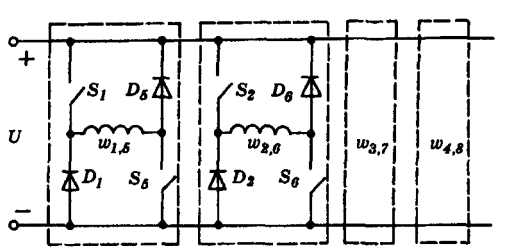


Рис. 37.67. Четырехканальный униполярный коммутатор

S_5 приводнт к подаче напряженя на обмотки $w_{1,5}$. Размыканне ключей сопровождается замыканнем тока обмотки через D_1 и D_5, а следовательно, изменением полярности напряжения на обмотке и рекуперацией энергин в источник. Импульсное регулирование тока в обмотках возможно двумя способами:

поочередным отпиранием и запнранием пар ключей S_1, S_5, а следовательно, изменением интервалов накоплення энергин и ее рекуперацин прн знакопеременном напряженни на обмотке;

поочередным отпнранием пары ключей S_1, S_5 и запнранием одного из них. При этом напряженне на обмотке представляет собой последовательность уннполярных импульсов. Во время паузы ток обмоткн замыкается в короткозамкнутом контуре $w_{1,5}$—S_1—D_5 лнбо $w_{1,5}$—S_5—D_1 в завнсимости от того, какой нз ключей остался проводящим. При таком алгоритме рекуперации не пронсходнт, процессы энергообмена в обмотках и источнике происходят более спокойно, с меньшимн потерямн мощности.

Описанные узлы коммутаторов могут нспользоваться с различными видами импульсных многоканальных регуляторов тока.

Формирование токов для компенсаторов неактивной мощности. Хорошо известен такой показатель качества потребляемой электрической энергии, как $\cos\varphi_н$. С увеличением доли нелинейных, нестационарных и несимметричных нагрузок в сетях представление о качестве потребляемой энергин существенно расширилось. Введем понятие "идеальная нагрузка" — нагрузка, при которой потребляемый ток $I_{ид}$ по форме и по фазе совпадает с напряжением. При любых отступлениях от тока идеальной нагрузкн реальный потребляемый ток $I_п$ можно представить суммой:

$$I_п = I_{ид} + I_{иск},$$

где $I_{иск}$ — составляющне реактивного тока н тока нскаженнй, которые не передают активной мощности.

Для того чтобы приблнзить реальную нагрузку к идеальной, необходнмо компенсировать все составляющие тока искажений. Эту задачу решает компенсатор — преобразователь, генерирующий в сеть ток $-I_{иск}$. Не обсуждая вопроса о методах измерений составляющих, отметим, что компенсатор должен обладать свойствамн управляемого быстродействующего источника тока, подключенного к сети. Основное требование, предъявляемое к компенсатору — быстродействие прн отработке сигналов управленя аналогового или цифрового вычислительного устройства, задающего мгновенное значенне тока компенсации.

Формированне регулируемых внешних характеристик. Большая часть преобразовательных устройств обладает свойствами источнпка напряженя (выпрямители, инверторы напряжения, нмпульсные регуляторы постоянного напряжения) либо источника тока (зарядные устройства аккумуляторных батарей, компенсаторы неактивной мощности). Между тем все чаще возннкает потребность в источниках питания с заданной формой внешней характеристнки. Так, для некоторых видов электропривода необходима характеристика, отвечающая требованию ограннчення пускового тока и момента I, M, быстрого выхода на режнм заданной скорости U, ω и ограничеиия ее при отсутствии нагрузки (рис. 37.68, *а*). Подобным образом требуется формировать характеристику сварочных агрегатов с резкнм подъемом напряжения холостого хода, облегчающнм зажигание дуги, и ограниченным током короткого замыкания (рис. 37.68, *б*).

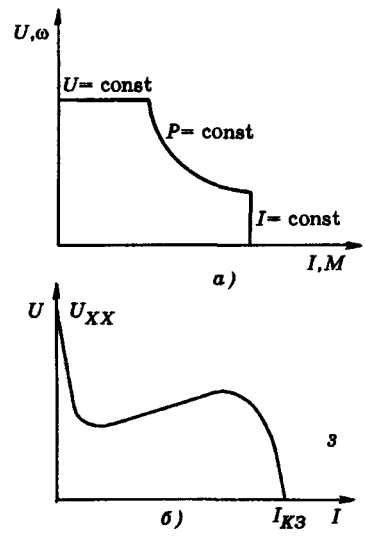


Рис. 37.68. Примеры искусственных внешних характеристик

а — привода; *б* — сварочной установки

Преобразователи с заданной регулируемой формой внешней характеристики обычно выполняются на основе импульсных регуляторов с обратнымн связями по току, напряжению или иным регулируемым параметрам. Проблема создания таких преобразователей решается путем определення участка регулируемой внешней характернстикн, установления требуемых обратных связей н коэффнциентов передачи регулятора по току или напряжению в соответствнн с наклоном характеристнки.

37.16. ВЫХОДНЫЕ ФИЛЬТРЫ АВТОНОМНЫХ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Для улучшения гармоннческого состава выходного напряжения преобразователей используются два метода:

1) выбор способа формирования выходного напряжения (ШИР, ШИМ и пр.), прн котором удается повысить частоту и снизнть амплнтуду высших гармоник;

2) примененне пассивных фильтров, которые максимально ослабляют высшие гармоннки и передают основную гармоннку в нагрузку с нанменьшим ослаблением.

Выбор каждого из методов в формированнн выходного напряжения требуемого качества делается

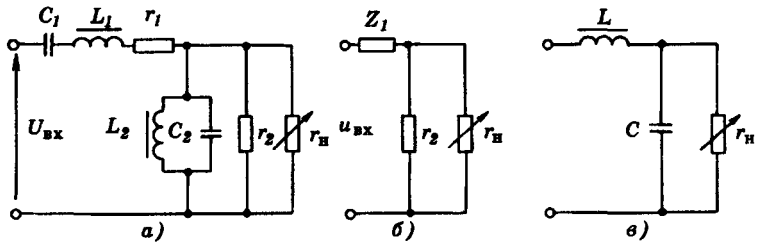


Рис. 37.69. Принципиальные схемы фильтров инверторов напряжения

а — Г-образный полосовой фильтр; *б* — Г-образный режекторный фильтр; *в* — Г-образный *LC*-фильтр

на основе компромнсса между сложностью способа формнрования и массогабаритными показателями преобразователя.

В настоящем параграфе приводятся сведения по определенню параметров и структуры фильтра прн выбранном способе формнрования напряження.

Г-образный полосовой фильтр (рис. 37.69, *а*) состоит из двух резонансных контуров: последовательного (L_1, C_1) и параллельного (L_2, C_2), каждый из которых настроен на основную гармонику (сопротивленния r_1 и r_2 учнтывают потерн в элементах). Последовательный контур с резонансом напряжений на основной частоте имеет малое сопротивление для токов этой частоты, а параллельный контур с резонансом токов, наоборот, имеет большое сопротивление, что обеспечивает достаточно высокнй коэффициент передачи по основной гармоннке. В то же время для токов высоких частот за счет включения последовательно с нагрузкой дросселя L_1 н параллельно ей конденсатора C_2 коэффнциент передачи оказывается небольшнм.

Резонансные контуры фильтра можно характернзовать следующими основными параметрами (пренебрегая активнымн потерями в контуре, что обычно делается при ннженерных расчетах): $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ — резонансная частота контура; $\rho = \sqrt{L/C} = \omega_0 L = 1/(\omega_0 C)$ — характернстическое сопротивление контура; $\Delta = \omega_n/\omega_0 - \omega_0/\omega_n = (n^2-1)/n$ — относительная расстройка контура для частоты n-й гармоннкн; $S = U_н^2/\rho$ — установленная мощность элементов контура; $\varepsilon = S/P_н$ — относнтельное значенне установленной мощностн элементов контура; $P_н$ — мощность нагрузкн.

При расчете фильтра необходимо так распределнть установленную мощность фильтра между его элементами, чтобы заданному значению суммарной установленной мощностн фильтра соответствовало наибольшее ослабление высших гармоннк.

Максимальное ослабление любой из высших гармоннк прн заданной установленной мощности фильтра $S_\Sigma = S_1 + S_2$ получается, когда мощности обоих контуров фильтра равны, т. е.

$$S_1 = S_2 = \sqrt{\varepsilon}\, P_н,$$

тогда

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon/4 = S_1 S_2/4P_н.$$

Модуль коэффициента передачи напряжения фильтра для любой гармоники

$$k_{un} = 1 \Big/ \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon}{16}\Delta^2\right)^2 + p^2 \frac{\varepsilon^2}{16}\Delta^2},$$

где $p = R_{н.ном}/R_и$ — коэффициент нагрузки ($0 \le p \le 1$).

При расчете фильтра необходимо, чтобы прнняτое значение ε было больше $\varepsilon_{рез}$, прн котором наступает резонанс на самой низшей нз высших гармоник выходного напряжения ннвертора, т. е.

$$\varepsilon > 4n/(n^2-1).$$

Коэффицнент гармоннк $k_г$ связан с коэффициентом передачи напряжения фильтра соотношением

$$k_г = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5...}^{\infty} (k_{un}U_n)^2}}{k_{u1}U_1}.$$

На рнс. 37.70 прнведена завнсимость коэффициента гармоннк на выходе полосового фильтра от относнтельного значення установленной мощности элементов фильтра.

Полосовой фильтр нмеет значительную установленную мощность, его коэффициент передачи на-

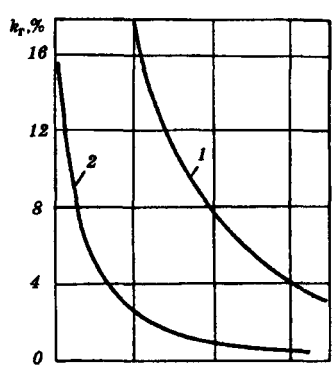


Рис. 37.70. Зависимость коэффициента гармоник на выходе фильтра от относительной расстройки ε

1 — для однофазного инвертора; *2* — для трехфазного инвертора

пряження зависнт от характера нагрузки, поэтому в некоторых случаях применяют режекторный (заградительный) фильтр, представляющий собой последовательный резонансный контур, настроенный на частоту основной гармоники выходного напряжения инвертора, и включаемый последовательно с нагрузкой. Шунтированне нагрузки конденсатором C_2 создает цепь для замыкания токов высших гармоник.

Коэффициент передачи напряжения по основной гармоннке фильтра близок к единице: $k_{u1} \approx 1$, а коэффицнент передачн напряжения фильтра для высших гармоник

$$k_{un} = 1 \Big/ \sqrt{\left[1 - \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2(n^2-1)}{1+\varepsilon_2^2}\right]^2 + p^2\frac{\varepsilon_1^2\Delta^2}{(1+\varepsilon_2)^2}},$$

где $\varepsilon_2 = Q_2/P_н$ — относительная установленная мощность шунтнрующего конденсатора,

$$Q_2 = U_н^2\omega_1 C_2.$$

Минимальное ослабление фильтром высших гармоник будет в режиме холостого хода ($p = 0$):

$$k_{un} = \frac{1}{1-\varepsilon_1\varepsilon_2\dfrac{n^2-1}{1+\varepsilon_2^2}}.$$

На n-й гармоннке возннкает резонанс, еслн $\varepsilon_1\varepsilon_2(n^2-1)/(1+\varepsilon_2^2) = 1$.

Условие оптимального распределения установленной мощности элементов фильтра

$$\varepsilon_2^2 + 2\varepsilon_2/\varepsilon - 1 = 0,$$

где $\varepsilon = 2\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ — относнтельное значение суммарной мощностн всего фильтра.

При этом оптимальная зависимость между относительными значениями установленной мощности шунтнрующего конденсатора и суммарной мощности всего фильтра

$$\varepsilon_{2опт} = \frac{\sqrt{\varepsilon^2+1}-1}{\varepsilon};$$

обычно $\varepsilon_{2опт} = 0{,}68 \div 0{,}78$.

Еслн преобразователь используется в качестве вторичного источника питання, то $\varepsilon_2 \le 0{,}5$. Прн этом установленная мощность режекторного фильтра приблнзительно в 1,33 раза меньше, чем полосового фильтра. На рнс. 37.71 прнведены завнсимости коэффициента гармоник на выходе Г-образного полосового фильтра от угла $\theta = \omega_1 t_n$ при различных значениях ε для однофазного мостового нивертора в режиме холостого хода.

Индуктивно-емкостный однозвенный фильтр (*LC*-фильтр, рис. 37.69, *в*) является наиболее простым типом фильтра. Относительные значения ус-

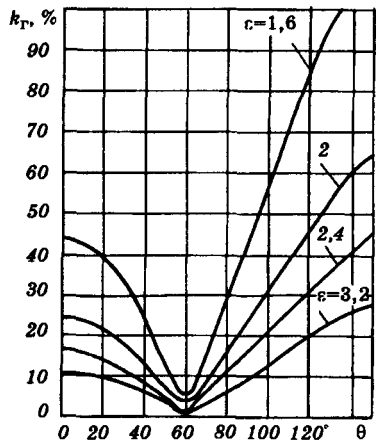


Рис. 37.71. Зависимость коэффициента гармоник на выходе Г-образного режекторного фильтра от угла θ при различных значениях расстройки ε для однофазного мостового инвертора ($p = 0$)

тановленных мощностей элементов фильтров, еслн пренебрегать потерями в элементах фильтра,

$$\varepsilon_2 = U_{вых}^2\omega_1 C_2/P_н^2 = R_н\omega_1 C_2;$$

$$\varepsilon_1 = \left[\left(1+\varepsilon_2\right)^2 + \varepsilon_2^2\right]\omega_1 L_1/R_н.$$

Модуль коэффнцнента передачи напряжения фильтра

$$k_{un} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \dfrac{n^2\varepsilon_1\varepsilon_2}{1+\varepsilon_2^2}\right)^2 + \left(\dfrac{n\varepsilon_1 p}{1+\varepsilon_2}\right)^2}}.$$

Так же как в полосовом и режекторном фильтрах, в *LC*-фильтре минимальное значение коэффнцнента гармоник $k_г$ соответствует режиму холостого хода ($p = 0$), а потери в фильтре не влняют на форму выходного напряжения.

Оптимальное с точки зрения получения минимального коэффнцнента гармоник $k_г$ соотношение между установленнымн мощностями последовательного и параллельного элементов фильтра прн $p = 0$ является $\varepsilon_{2опт} = 1$.

Условие резонанса в *LC*-фильтре в режиме холостого хода ($p = 0$)

$$\left(1+\varepsilon_2^2\right)/\varepsilon_1\varepsilon_2 = n^2.$$

С учетом $\varepsilon_{2опт} = 1$ получаем значение ε_1, при котором возможен резонанс, $\varepsilon_1 = 2/n^2$. Г-образный индуктивно-емкостный фильтр может войти в резонанс на частоте основной гармоники напряження, еслн $\varepsilon_1 = 2$, а $\varepsilon_2 = 1$, в то время как полосовой и режекторный фильтры этим свойством не обладают. Возможность резонанса в *LC*-фильтре на основной частоте приводнт к резкой зависимости выходного напряжения, что является недостатком этого

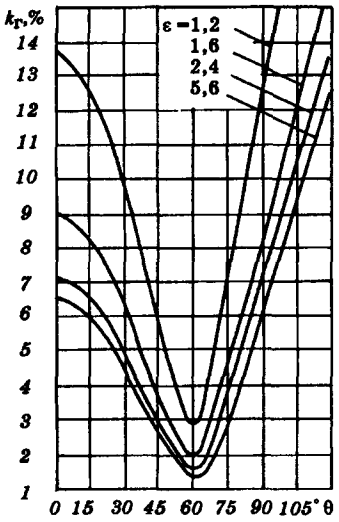


Рис. 37.72. Зависимость коэффициента гармоник на выходе Г-образного фильтра от угла θ при различных значениях расстройки ε для однофазного мостового инвертора ($p = 0$)

фильтра. Установленная мощность *LC*-фильтра меньше при равных условнях, чем полосового и режекторного фильтров. Внешняя характеристнка фильтра делает целесообразным его примененне в случае мало изменяющейся нагрузкн.

Общим недостатком выходных фильтров, показанных на рис. 37.69, является большая установленная мощность элементов, а следовательно большие габарнты и масса.

На рис. 37.72 приведены зависимостн коэффнцнента гармоник на выходе Г-образного *LC*-фильтра от угла θ при различных значениях ε для однофазного мостового инвертора в режиме холостого хода.

37.17. АВТОНОМНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ИНВЕРТОРЫ

Резонансные АИ (АИР) могут быть разделены на две подгруппы в зависимости от отсутствия илн наличия днодов, включенных встречно-параллельно тиристорам в плечах вентильного коммутатора (называемых обычно "обратнымн" днодамн). Эти две подгруппы различаются своими характеристиками, причем возможно их дальнейшее деленне в завнсимости от способа подключення конденсаторов и дросселей отиосительно нагрузкн, вентильного коммутатора и нсточника питання. Однако характерной особенностью всех инверторов данного типа является колебательный характер крнвой выходного тока тирнсторов в течение каждого рабочего полупериода, в результате оказывается возможным выполнение преобразователей на сравнительно дешевых однооперацнонных тирнсторах. Такой характер процессов обусловлен резонаснымн свойствами цепи анодного тока, состоящей из специально введенных в схему инвертора емкостей н индуктивностей н элементов схемы нагрузки.

На рис. 37.73, *а* показана в качестве примера однофазная схема мостового АИР без обратных диодов. В общем случае параллельно нагрузке включен компенсирующий конденсатор C_1, а последовательно с ннми включен конденсатор C_2, обеспечнвающнй вместе с суммарной индуктивностью $L = L_1 + L_2$ колебательный процесс в выходной днагонали вентильного моста. На практике возможна работа инвертора без C_2 (т. е. при $C_2 = \infty$, тогда C_1 должен обеспечить некоторую перекомпенсацию нагрузки), либо без C_1 (т. е. прн $C_1 = 0$, тогда активная составляющая сопротивления нагрузки должна быть небольшой, чтобы не вносить в *LC*-контур большого затухания).

Индуктивность, обеспечивающая колебательный характер тока в цепн АИР, на рнс. 37.73, *а* показана разделенной на две части: L_1 н L_2, которые включены соответственно на стороне переменного н постоянного тока. Нагрузка $Z_н$ иногда вместе с конденсатором C_1 может быть включена через согласующнй трансформатор.

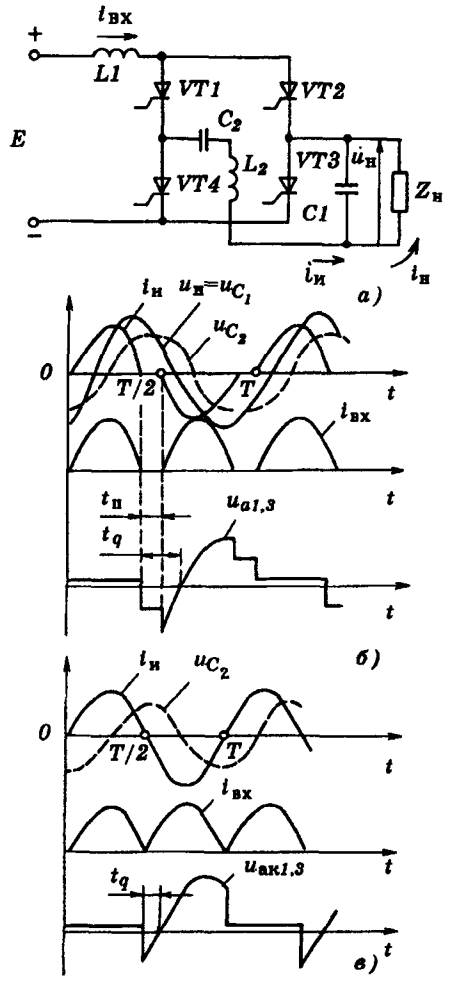


Рис. 37.73. Схема мостового резонансного инвертора без обратных диодов (*а*) и кривые токов и напряжений в режиме с паузой (*б*) и в граничном режиме (*в*)

Значение суммарной индуктивности $L = L_1 + L_2$ и емкости конденсаторов C_1 и C_2 выбираются так, чтобы при всех возможных соотношениях эквивалентного активного сопротивления $R_н$ и индуктивности $L_н$ нагрузки резонансная частота цепи, образующейся при одновременном отпирании тиристоров *VT1* и *VT3* или *VT2* и *VT4*, была несколько выше (или в предельном случае равна) частоты управляющих импульсов. В этом случае, который показан на рис. 37.73, *б*, ток через соответствующую пару тиристоров снижается и становится равным нулю до момента отпирания очередной пары. Длительность паузы между полуволнами тока равна

$$t_п = \frac{T - T_0}{2} = 4\pi(1/\omega - 1/\omega_0),$$

где T и ω — период и угловая частота управляющих импульсов, задаваемые системой управления; T_0 и ω_0 — период и угловая резонансная частота контура. Обычно $t_п = (0{,}1 \div 0{,}2)T/2$.

Несмотря на наличие паузы, кривая напряжения на нагрузке $u_н$ благодаря конденсатору C_1 близка к синусоидальной.

Если принять, что конденсатор C_1 обеспечивает полную компенсацию нагрузки, т. е. цепь C_1, $Z_н$ может быть представлена эквивалентным активным сопротивлением $R_э \approx R_н$, собственная частота контура АИР

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_2} - \left(\frac{R'_э}{2L}\right)^2},$$

где $R'_э = R_э / n_{тр}^2$ — приведенное эквивалентное сопротивление нагрузки (при наличии трансформатора); $L = L_1 + L_2$.

При этом необходимо, чтобы

$$R'_э < 2\sqrt{L/C_2}.$$

Из кривой напряжения между анодом и катодом тиристоров ($u_{a1,3}$, рис. 37.73, *б*) видно, что время t_q, предоставляемое для восстановления запирающих свойств, превышает длительность паузы $t_п$. Это обусловлено наличием индуктивности L_1 в цепи постоянного тока, так как при отпирании следующей пары тиристоров нарастающий ток $i_{вх}$ создает на этой индуктивности ЭДС самоиндукции, которая вызывает дополнительный скачок обратного напряжения. Такое увеличение t_q позволяет применять данный АИР на сравнительно высоких частотах. Скачок обратного напряжения и добавка к времени $t_п$ зависят от соотношения индуктивностей L_1 и L_2. Обычно выбирают $L_1/L_2 = 0{,}3 \div 0{,}5$, так как при слишком большой L_1 возрастают амплитудные значения прямого и обратного напряжений на тиристорах.

Приведенные выше соотношения справедливы также для чисто последовательного инвертора, когда $C_1 = 0$ и $L = L_1 + L_2 + L_н$ (при допущении, что нагрузка представлена последовательным соединением активного и индуктивного сопротивлений).

Для получения в АИР на тиристорах обратного напряжения на интервале $t_п$ необходимо, чтобы конденсатор C_2 зарядился к концу импульса тока до напряжения, превышающего E. В установившемся режиме амплитудное напряжение на конденсаторе в этом случае равно

$$U_{C_2 max} = E\frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{1 - e^{-\pi/2Q}},$$

где $Q = \omega_0 L / R_н$ — добротность колебательного контура. На рис. 37.74 построена зависимость $U_{C_2 max} = f(Q)$. На практике обычно $Q = 1{,}5 \div 3$, а при питании от низковольтных источников (при $E \le 100$ В) возможны и большие значения $Q = 3 \div 5$.

На рис. 37.73, *в* показаны диаграммы токов и напряжений при работе последовательно-параллельного или последовательного инвертора в граничном режиме, т. е. при $\omega_0 = \omega$ и $t_п = 0$. Такой режим возможен только при наличии индуктивности L_1.

Следует заметить, что при $L_2 = 0$ (т. е. когда вся индуктивность сосредоточена на стороне постоянного тока) и при $\omega_0 < \omega$, входной ток $i_{вх}$ получается непрерывным. Такой режим работы рассматриваемой схемы следует считать характерным уже не для резонансного инвертора, а для инвертора тока, особенно если L_1 велика и пульсации входного тока малы.

Кроме показанной на рис. 37.73, *а* мостовой схемы, АИР может быть также выполнен по полумостовой схеме (рис. 37.75). Конденсаторы C могут быть фильтровыми и одновременно служить для со-

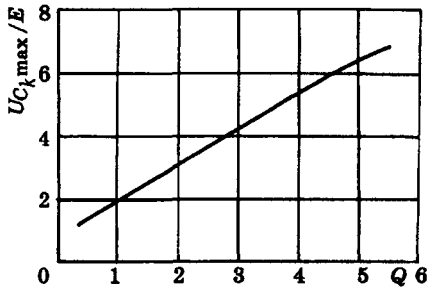


Рис. 37.74. Зависимость напряжения на последовательном конденсаторе от добротности контура

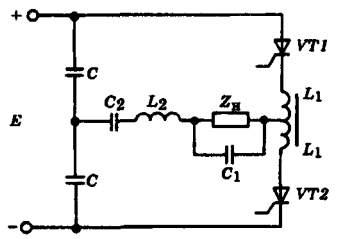


Рис. 37.75. Полумостовая схема резонансного инвертора

здания нулевой точки источника питания (в этом случае необходимо, чтобы их емкость была достаточно велика) либо могут использоваться как последовательная емкость колебательного контура (тогда необходим отдельный фильтровый конденсатор в цепи постоянного тока). В последнем случае их можно считать включеннымн для переменных составляющих тока параллельно, тогда отдельный конденсатор C_2 не нужен н следует считать $C_2 = 2C$.

Из рассмотрения процессов в АИР следует, что они обладают следующими особенностями:

а) кривая тока через тиристоры имеет форму полусинусоидальных нмпульсов, скорость изменення тока прн включении или перед выключением тиристоров определяется в первом приближенин собственной частотой резонансного контура ω_0 и амплнтудным значением тока I_{am}:

$$\left|\frac{di_a}{dt}\right|_{вкл} \approx \left|\frac{di_a}{dt}\right|_{выкл} \approx \frac{6I_{am}}{I_0} = \frac{3\omega_0 I_{am}}{\pi}.$$

Поэтому даже прн сравнительно высоких частотах значение di/dt может быть сравнительно небольшим; например, при $f_0 = 10$ кГц н $I_{am} = 500$ А; $di/dt = 30$ А/мкс;

б) скорость изменення напряжения на тнрнсторах прн переходе от обратного напряжения к прямому также сравнительно невелика (в этом отношении АИР подобны инверторам тока);

в) время, предоставляемое для восстановления управляемости тиристоров, может быть при необходимости сравнительно большим за счет паузы между нмпульсамн тока и выбора правильного соотношения между L_1 и L_2 (см. рис. 37.73,б).

Указанные выше особенности полезны при использованин АИР на повышенных частотах (свыше 1 кГц). В то же время следует отметить, что именно при частотах порядка нескольких килогерц массогабаритные показателн конденсаторов и реакторов, специально введенных в состав АИР для получення требуемого характера изменения тока, получаются относительно небольшими. Поэтому область предпочтительного нспользования АИР лежит в диапазоне частот выше 1 кГц.

К числу недостатков АИР относятся падающая внешняя характеристика и зависимость времени t_q от параметров нагрузки, особенно заметная в чисто последовательном илн чнсто параллельном инверторе.

Существенное ослабленне указанных недостатков достнгается в АИР с обратными диодамн. Мостовая схема такого инвертора при наличии последовательного н параллельного конденсаторов приведена на рис. 37.76, *а*.

На рис. 37.76, *б* показаны кривые выходного $i_н$ и входного $i_{вх}$ токов вентильного коммутатора, а также кривая напряжения на нагрузке $u_н$ н напряжения на тиристорах в режиме "без паузы" (называемом иногда режимом непрерывного тока) такого иивертора. При работе в таком режнме очередная пара тиристоров отпнрается до спада к нулю тока через обратные дноды противофазных плеч. Напри-

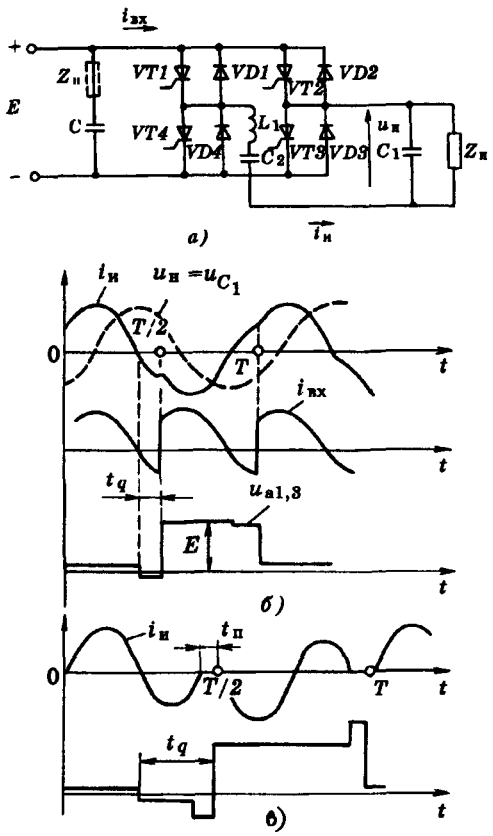


Рис. 37.76. Мостовая схема резонансного инвертора с обратными диодами (*а*), графики токов и напряжений в режиме без паузы (*б*) и в режиме с паузой (*в*)

мер, когда на первом полупериоде ($0 \le t \le T/2$) ток проходнт через тирнсторы *VT1* и *VT3* н затем переходит на диоды *VD1* и *VD3*, в момент $t = T/2$ отпирает тиристоры *VT2* и *VT4* и ток через дноды мгновенно прекращается. В кривой тока $i_{вх}$ в моменты $T/2$, T и т. д. имеют место скачкн от отрицательных к положительным значенням. На практике для снижения скорости нарастания тока через тирнсторы в момент их отпираний в цепь обратных диодов включают небольшие реакторы, тогда спад тока через диоды и нарастанне тока через тиристоры происходят с некоторыми перекрытиями.

Из кривой u_a видно, что время t_q соответствует времени прохождення тока через обратные диоды, прнчем на этом интервале обратное напряжение на тиристорах близко к нулю (оно составляет 1÷2 В), а прямое напряжение по окончанни интервала t_q нарастает скачком. Последние два обстоятельства свидетельствуют о достаточно трудном режнме работы тиристоров в данной схеме.

Ток и напряжение для режнма "с паузой" показаны на рис. 37.76, *в*. В этом случае ток через обратные диоды успевает в течение полупериода упасть до нуля. Длительность паузы $t_п$ определяется приближенным выраженнем

$$t_п = T/2 - T_0 = \pi(1/\omega - 2/\omega_0)$$

(обозначения здесь те же, что и для схемы рис. 37.73, *а*).

В этом режиме скорость нарастания тока через тиристоры при отпирании существенно меньше, а длительность интервала t_q при той же частоте управления $f = 1/T$ больше (рис. 37.76, *в* внизу). Однако такой режим характеризуется резко несинусоидальной кривой выходного тока ВК, в результате чего и кривая $u_н$ получается более искаженной.

Преимуществами АИР с обратными диодами является более жесткая внешняя характеристика, чем у инвертора без таких диодов. Однако, как указывалось, режим работы тиристоров в таких инверторах тяжелее, в связи с чем необходимо либо работать при более низких частотах, либо использовать тиристоры с меньшим временем t_q и более высокими допустимыми значениями di/dt (для режима "без паузы") и du/dt.

На схеме с обратными диодами основан АИР с удвоением частоты. В таком АИР нагрузку включают не в диагональ переменного тока ВК, а параллельно его входу $Z_н$ (показано пунктиром на рис. 37.76, *а*). В этом случае конденсатор C является не фильтровым, а разделительным (для исключения постоянной составляющей тока через $Z_н$). Через нагрузку в такой схеме замыкается переменная составляющая входного тока ВК $i_{вх}$, в связи с чем частота основной гармоники тока нагрузки и напряжения на нагрузке в 2 раза выше, чем частота тиристоров. Для улучшения кривой $u_н$ параллельно нагрузке обычно включается конденсатор C_1.

37.18. ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) — устройства, предназначенные для преобразования входной электроэнергии переменного или постоянного напряжения с целью обеспечения электропитанием отдельных цепей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при заданном виде и качестве электроэнергии на выходе (нестабильности и пульсации напряжения при выходе на постоянном напряжении, отклонения частоты и искажения формы кривой напряжения при выходе на переменном напряжении).

ИВЭП могут быть выполнены в виде единой конструкции — блока вторичного электропитания (блока питания) и состоять из отдельных блоков, соответствующих функциональным узлам (субблокам), выполняющих одну или несколько функций (выпрямление, фильтрацию, инвертирование, стабилизацию и др.), или могут быть конструктивно включены в состав РЭА, для питания которой они предназначены.

Система вторичного электропитания — совокупность функционально связанных источников или, в частном случае, одного источника вторичного электропитания, устройств управления, коммутации, распределения, защиты, контроля и сигнализации, предназначенная для подключения к промышленным сетям переменного тока или автономным источникам электроснабжения и обеспечивающая по заданной программе электропитание всех цепей РЭА, путем формирования необходимых для их работы питающих напряжений с требуемыми параметрами.

Основными функциональными узлами ИВЭП являются:

импульсные регуляторы постоянного напряжения, с помощью которых осуществляется в общем случае регулирование отношения выходного и входного постоянных напряжений и в частном случае стабилизация выходного напряжения ИВЭП при изменении напряжения источника питания, тока нагрузки, температуры и других величин;

преобразователи постоянного напряжения в высокочастотное с трансформаторным разделением цепей.

37.19. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РЕГУЛЯТОРОВ

Три основных типа импульсных регуляторов постоянного напряжения (РПН), часто называемых регуляторами I, II и III рода и широко используемых на практике называемые ниже для краткости РНІ, РНІІ и РНІІІ) приведены на рис. 37.77, *а—в*. В качестве ключей *KI*, *KII*, *KIII* могут использоваться транзисторы, запираемые двухоперационные тиристоры или незапираемые тиристоры, снабженные соответствующими узлами принудительной коммутации.

Регулировочные характеристики трех основных схем РПН в предположении, что ключ K идеален (т. е. падение напряжения на нем во включенном состоянии и время включения и выключения равно нулю) и ток в дросселе $Др$ непрерывен, описываются соотношениями:

для РНІ $U_н = \gamma E$;

для РНІІ $U_н = E/(1-\gamma)$;

для РНІІІ $U_н = \gamma E/(1-\gamma)$,

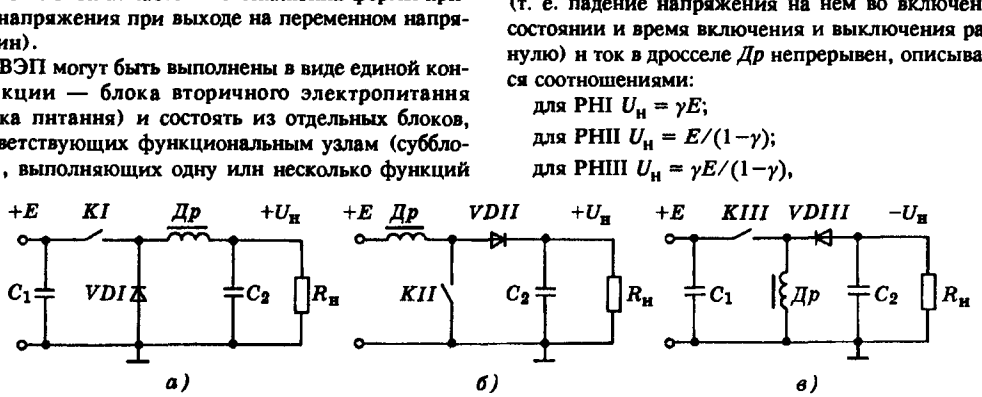


Рис. 37.77. Схемы РНІ (*а*), РНІІ (*б*) и РНІІІ (*в*)

где $U_н$ — среднее значение выходного напряжения; E — напряжение источника питания; $\gamma = t_и/T$ — относительное время включенного состояния ключа K (коэффициент заполнения); $T = t_и + t_п = 1/f$ — период частоты коммутации f; $t_и$, $t_п$ — время включенного (время импульса) и выключенного (время паузы) состояния ключа.

Для реальных РН, элементы которых имеют потери (из-за падения напряжения на ключе и на диоде во включенном состоянии, наличия сопротивления у обмотки дросселя и др.), КПД можно записать в виде

$$\eta = \frac{U_н I_н}{U_н I_н + \sum P_п},$$

где $\sum P_п$ — суммарные потери мощности во всех элементах.

Тогда в правые части соотношений, описывающих регулировочные характеристики всех трех основных типов регуляторов, следует ввести сомножитель η.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРА I РОДА

В РНI (рис. 37.77, *а*) основным является режим непрерывного тока в дросселе. Одиако при малых γ или выходном токе такой регулятор может перейти в режим прерывистого тока в дросселе.

Режим непрерывного тока в дросселе. На рис. 37.78 показаны временные диаграммы токов и напряжений для этого режима, где I_{min} и I_{max} — минимальное и максимальное значения тока i_{VD}.

$$I_{min\,(max)} = I_н \mp \frac{(E - U_н)\gamma}{2Lf},$$

где знак минус соответствует минимальному, а плюс — максимальному значению тока.

Среднее значение тока через дроссель за период

$$I_{Др} = (I_{min} + I_{max})/2 = I_н.$$

Напряжение на регулирующем ключе и на шунтирующем диоде в выключенном состоянии

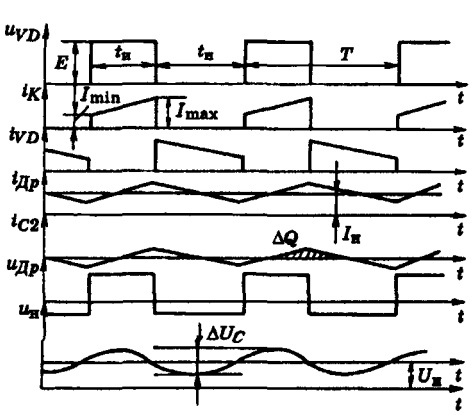


Рис. 37.78. Диаграммы токов и напряжений при работе РНI в режиме непрерывного тока

$$U_K = U_д = E.$$

Расчетная мощность ключа, показывающая степень использования ключа по отношению к мощности в нагрузке, при пренебрежении пульсациями тока в дросселе по сравнению со средним током дросселя

$$P_K = U_{K\,max} I_{K\,max} = P_н/\gamma.$$

Отсюда следует, что наилучшее использование регулирующего ключа по мощности имеет место при $\gamma \to 1$.

Найдем критическое значение тока нагрузки, которое при заданной индуктивности дросселя еще поддерживает режим непрерывного тока. С этой целью полагаем $I_{min} = 0$, тогда

$$I_{н.кр} = E\gamma(1-\gamma)/(2Lf).$$

Аналогично можно найти критическую индуктивность, которая при заданном токе нагрузки еще поддерживает режим непрерывного тока в регуляторе,

$$L_{кр} = E\gamma(1-\gamma)/(2I_н f).$$

Режим прерывистого тока в дросселе. Если ток нагрузки $I_н < I_{н.кр}$ при заданной индуктивности дросселя либо $L < L_{кр}$ при заданном токе нагрузки, то регулятор переходит в режим прерывистых токов в дросселе. В этом случае регулировочная характеристика отличается от регулировочной характеристики в режиме непрерывных токов и может быть получена в предположении, что $I_{min} = 0$:

$$\frac{U_н}{E} = \frac{\gamma^2}{4\tau_н f}\left[\sqrt{1 + \frac{8\tau_{Др.н} f}{\gamma^2}} - 1\right],$$

где $\tau_{Др.н} = L/R_н$.

Регулировочная характеристика изображена на рис. 37.79 для двух значений $\tau_{Др.н}$ штриховыми линиями *2* и *3*. Видно, что режим непрерывных токов в дросселе наступает тем раньше, чем больше $\tau_{Др.н}$. Заменив левую часть на γ, находим $\gamma_{кр}$, при котором наступает критический режим,

$$\gamma_{кр} = 1 - 2\tau_{Др.н} f.$$

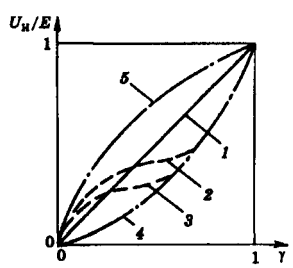


Рис. 37.79. Регулировочные характеристики РНI

1 — для основной схемы регулятора в режиме непрерывного тока; *2* и *3* — то же в режиме прерывистого тока при двух значениях $\tau_{Др.н1}$ и $\tau_{Др.н2} > \tau_{Др.н1}$; *4* и *5* для варианта по схеме 37.77, *а* при $n < 1$ и $n > 1$

Раскрывая $\tau_{Др.н}$ и замеияя $R_н$ на $U_н/I_н$, преобразуем это выражеиие к виду

$$U_н/E = \gamma^2 \Big/ \left(\gamma^2 - \frac{2LI_н f}{E}\right).$$

Оио является по существу виешней характеристикой идеальиого РНІ в режиме прерывистого тока. Эти характеристики при различных γ показаны в отиосительных единицах на рис. 37.80. При $I_н > I_{и.кр}$ внешняя характеристика идеального регулятора не зависит от тока нагрузки.

Внешняя характеристика реального РН в режиме иепрерывного тока зависит от тока нагрузки и при $I_н > I_{н.кр}$, что обусловлено неидеальиостью компонентов регулятора и в первую очередь наличием сопротивления обмотки дросселя:

$$U_н/E = \gamma - I_н r/E.$$

Эти характеристики показаиы на рис. 37.80 штриховыми линиями в области *2*. Выходиое сопротивление РНІ

$$R_{вых} = -\partial U_н/\partial I_н = r.$$

Пульсации выходного напряжения. Для определения пульсаций выходного напряжения в режиме иепрерывных токов иеобходимо при ранее принятых допущениях найти изменение заряда ΔQ в фильтрующем конденсаторе C_2, обусловливающее изменеиие выходиого иапряжения от минимального его значения до максимального:

$$\Delta Q = \frac{1}{2}\frac{(E-U_н)t_и}{2L}\left(\frac{t_и}{2} + \frac{t_н}{2}\right).$$

Учитывая, что $\Delta Q = C_2 \Delta U_{C_2}$, находим

$$\Delta U_{C_2} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{8LC_2 f^2} = \frac{U_н(1-\gamma)}{8LC_2 f^2}.$$

Отсюда следует, что радикальным способом уменьшения пульсаций выходиого напряжения при заданиых значениях L и C_2 или уменьшения массы и размеров фильтра при заданных пульсациях ΔU_{C_2} является повышение рабочей частоты для РН.

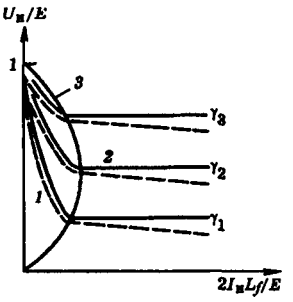


Рис. 37.80. Внешние характеристики РНІ при различных γ для режимов прерывистого (область *1*) и непрерывного (область *2*) тока. Граничная линия *3* построена по формуле для $I_{н.кр}$

Выше при определении пульсаций выходного напряжения предполагалось, что внутреииее сопротивление конденсатора фильтра для переменной составляющей тока равно нулю. Реальный электролитический кондеисатор в большинстве практических случаев может быть представлен последовательным соединиеиием трех величин: емкости C, активного сопротивления r_C и индуктивности L_C. Последние две составляющие полиого сопротивлеиия обусловлены физическими явлениями и конструктивными особенностями электролитических кондеисаторов и обычно лежат в пределах:

$$r_C = (4 \div 11)10^{-3}\ \text{Ом}, \quad L_C = (12 \div 18)10^{-12}\ \text{Гн}.$$

Расчет пульсаций выходного напряжения с учетом этих дополнительных составляющих и в предположении треугольной формы кривой тока через конденсатор дает дополнительную "паразитную" составляющую пульсаций

$$\Delta U_{C\ паразит} = \frac{r_C U_н(1-\gamma)}{Lf} + \frac{L_C}{L}\frac{U_н}{\gamma}.$$

В большинстве случаев именно эта составляющая определяет пульсации выходного напряжения.

На практике емкость конденсатора фильтра необходимо выбирать также из условия получения достаточно малых дииамических пульсаций, обусловленных ступеичатым изменением тока нагрузки. Уменьшение динамических пульсаций возможно только за счет увеличения емкости конденсатора фильтра. Анализ процессов при ступенчатом изменении тока позволяет получить следующее выражение для выбора емкости фильтра по заданной амплитуде динамических пульсаций выходного напряжения $\Delta U_{C\ дин}$:

$$\frac{t_{нараст}}{r_C} \geq C_2 \geq \frac{\Delta I_н t_{нараст}}{2\Delta U_{C\ дин} - \Delta I_н r_C},$$

где $t_{нараст} \approx \varepsilon T$ — время нарастания тока в дросселе до нового установившегося значения; $\varepsilon = L/L_{кр}$ — превышение индуктивности дросселя над критическим значением индуктивности; T — период работы регулируемого ключа; $\Delta I_н$ — ступенчатое изменение тока нагрузки от установившегося значения.

Из левого неравенства можно сделать вывод о нецелесообразности выбора емкости конденсатора больше, $t_{нараст}/r_C$, ибо это не приведет к уменьшению динамических пульсаций правое неравенство дает значение иеобходимой емкости. Коэффициент ε выбирается из условия компромисса между значением потерь в сердечнике дросселя и потерь в сопротивлении его обмотки. С ростом ε потери в сердечнике уменьшаются из-за уменьшения амплитуды пульсаций тока дросселя, а потери в сопротивлении обмотки растут из-за увеличения числа витков. Значение $\varepsilon = 10 \div 15$ является разумным компромиссом.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛЯТОРА II РОДА

Простейшая схема регулятора РНП показана на рис. 37.77, *б*, а временные диаграммы, поясняющие его работу в режиме непрерывного тока в дросселе, — на рис. 37.81. В отличие от РНІ в РНП сглаживание пульсаций выходного напряжения выполняет только конденсатор фильтра.

Режим непрерывного тока. Будем считать, что все ранее принятые допущения справедливы и для РНП. Тогда регулировочная характеристика РНП в относительных единицах имеет вид

$$U_н/E = 1/(1-\gamma).$$

На рис. 37.82 показана регулировочная характеристика РНП (линия *1*). Определим минимальное и максимальное значения тока дросселя:

$$I_{\min(\max)} = \frac{I_н}{1-\gamma} \mp \frac{E\gamma}{2Lf}.$$

Среднее значение тока через дроссель

$$I_{Др} = \frac{I_{\min}+I_{\max}}{2} = \frac{I_н}{1-\gamma}.$$

Напряжение на регулирующем ключе в разомкнутом состоянии и обратное напряжение на диоде

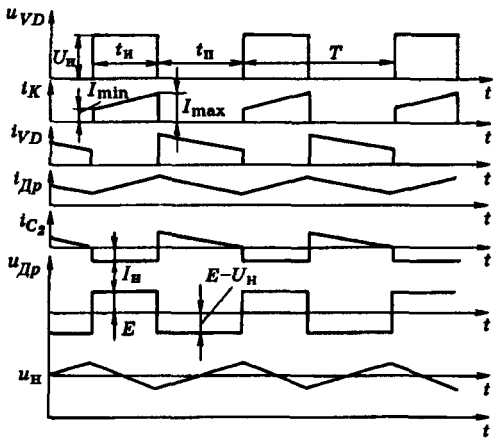


Рис. 37.81. Диаграммы токов и напряжений при работе РНП в режиме непрерывного тока

$$U_K = U_Д = U_н = \frac{E}{1-\gamma}.$$

Расчетная мощность регулирующего ключа

$$P_K = I_{K\max}U_{K\max} = \frac{I_н}{1-\gamma}U_н = \frac{P_н}{1-\gamma}.$$

Следовательно, использоваиие регулирующего ключа по мощности при $g \to 1$ ухудшается.

Найдем критические значеиия тока нагрузки и индуктивности дросселя, при которых еще поддерживается режим иепрерывного тока. Подставив $I_{\min} = 0$, получим

$$I_{н,кр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2Lf};$$

$$L_{кр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2I_н f}.$$

Режим прерывистого тока дросселя. Если $I_н < I_{н.кр}$ при заданной индуктивности дросселя либо $L<L_{кр}$ при заданном $I_н$, то РНП переходит в режим прерывистого тока в дросселе. Регулировочная характеристика в этом режиме

$$\frac{U_н}{E} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\gamma^2}{2\tau_{Др.н}f}},$$

где $\tau_{Др.н} = L/R_н$.

Регулировочная характеристика в режиме прерывистого тока изображена на рис. 37.79 штриховой линией *2*. Последнее соотношение можно преобразовать к виду

$$\frac{U_н}{E} = 1 + \frac{\gamma^2}{2LI_н f/E}.$$

Это выражение, по существу, описывает внешнюю характеристику идеального РНП в относительных единицах в режиме прерывистого тока. Эти характеристики при различных γ показаны на рис. 37.83 сплошными лиииями в области *1*.

Внешние характеристики регулятора. Для реального РНП в режиме непрерывного тока внешняя характеристика в относительных единицах имеет вид:

$$\frac{U_н}{E} = \frac{1}{1-\gamma} - \frac{I_н r}{(1-\gamma)^2 E}.$$

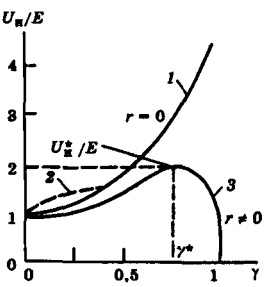


Рис. 37.82. Регулировочные характеристики РНП

1 — в режиме непрерывного тока для идеальных элементов; 2 — в режиме прерывистого тока; 3 — для реального регулятора в режиме непрерывного тока

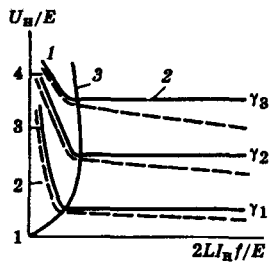


Рис. 37.83. Внешние характеристики РНП при различных γ для режимов прерывистого (область *1*) и непрерывного (область *2*) токов. Граничная линия *3* построена по формуле для $I_{н.кр}$

Внешние характеристики при различных γ показаны на рис. 37.83 штриховыми линиями в области *2*. Выходное сопротивление РНП равно

$$R_{вых} = -\frac{\partial U_н}{\partial I_н} = \frac{r}{(1-\gamma)^2}.$$

Заменив $I_н$ на $U_н/R_н$, запишем внешнюю характеристику в другой форме:

$$\frac{U_н}{E} = \frac{1-\gamma}{(1-\gamma)^2 + r/R_н}.$$

Дифференцируя это выражение по γ, находим γ^*, при которой характеристика имеет максимум,

$$\gamma^* = 1 - \sqrt{r/R_н}.$$

При этом максимум выходного напряжения равен

$$U_н^*/E = 0{,}5\sqrt{R_н/r}.$$

Таким образом, учет конечного сопротивления обмотки дросселя показывает, что в режиме непрерывного тока внешняя характеристика зависит как от $I_н$, так и в сильной степени от γ, а уровень выходного напряжения не может превысить некоторого максимального значения и становится тем меньше, чем больше отношение $r/R_н$.

Регулировочная характеристика при $r = 0{,}625R_н$ показана на рис. 37.83 линией *3*.

Пульсации выходного напряжения. Из временной диаграммы тока в конденсаторе фильтра (см. рис. 37.81) можно видеть, что $\Delta Q = I_н\gamma/f$, где ΔQ — заряд, отбираемый от конденсатора фильтра за время работы регулирующего ключа. Тогда

$$\Delta U_{C_2} = I_н\gamma/(fC_2).$$

Наличие у электролитических конденсаторов активной и индуктивной составляющих внутреннего сопротивления вызывает значительные пульсации выходного напряжения, причем влияние этих составляющих из-за импульсного характера тока через конденсатор в РНП сильнее, чем в РНІ.

РЕГУЛЯТОРЫ С ГАЛЬВАНИЧЕСКИМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЦЕПЕЙ

Простейшая схема РПН с гальваническим разделеиием входной и выходной цепей показана на рис. 37.84. Данный РПН является развитием регулятора III рода (см. рис. 37.77, *в*) на случай трансформаторного включения выходной цепи (возможно также ее автотрансформаторное включение). Поэтому регулировочная характеристика такого регулятора описывается выражением

$$U_н = E\frac{\gamma n}{1-\gamma},$$

где $n + w_{34}/w_{12}$ — коэффициент трансформации.

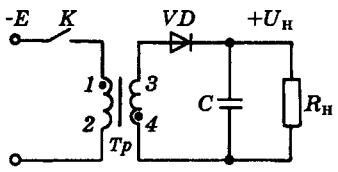


Рис. 37.84. Схема РНІІІ с двухобмоточным дросселем, осуществляющим трансформаторное разделение входной и выходной цепей

Из сопоставления схемы рис. 37.84 со схемой на рис. 37.77, *в* следует, что трансформатор *Тр* в схеме рис. 37.84 работает по сути дела в режиме дросселя: на интервале $t_и$ в нем происходит накопление энергии, а на интервале $t_п$ накопленная энергия отдается.

Схему на рис. 37.84 часто рассматривают также как однотактный преобразователь напряжения (поскольку здесь постоянное напряжение преобразуется в постоянное с промежуточным звеном переменного высокочастотного напряжения, которое при этом подвергается трансформации) с передачей энергии в паузе. В связи с этим основные показатели и характеристики этой схемы соответствуют однотактным преобразователям напряжения.

Рассматривая схему рис. 37.84 как РНІІІ, необходимо отметить ее худшие массогабаритные показатели по сравнению с РНІ и РНІІ.

РЕГУЛЯТОРЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ ВХОДНОЙ И ВЫХОДНОЙ ЦЕПЕЙ

В некоторых случаях, когда не требуется полной гальванической развязки входной и выходной цепей, а достаточно лишь их разделения по постоянному току, могут применяться РПН по схемам рис. 37.85, *а* или *б*.

Регулировочная характеристика рассматриваемых регуляторов в режиме непрерывного тока в обоих дросселях имеет вид

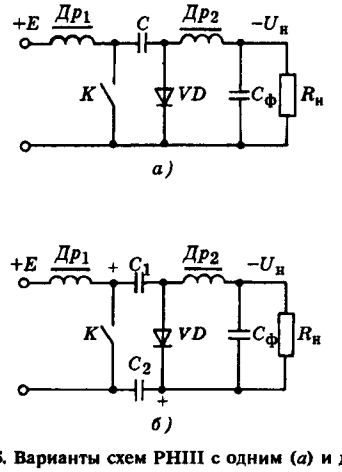


Рис. 37.85. Варианты схем РНІІІ с одним (*а*) и двумя (*б*) разделительными конденсаторами

$$U_н = -E\frac{\gamma}{1-\gamma}.$$

Минимальное и максимальное значения тока через дроссель $Др_1$ равны:

$$I_{Др1\min\,(\max)} = \frac{I_н\gamma}{1-\gamma} \mp \frac{E\gamma}{2L_1 f}.$$

Среднее значение тока через дроссель $Др_1$

$$I_{Др1} = \frac{I_{Др1\,\min} + I_{Др_1\,\max}}{2} = \frac{I_н\gamma}{1-\gamma}.$$

Критический ток нагрузки $I_{н.кр}$ и крнтическую индуктивность $L_{1кр}$ найдем из условия $I_{Др1\,\min} = 0$:

$$I_{н.кр} = \frac{E(1-\gamma)}{2L_1 f}; \quad L_{1кр} = \frac{E(1-\gamma)}{2I_н f}.$$

Минимальное, максимальное значения тока через дроссель $Др_2$ равны:

$$I_{Др2\min\,(\max)} = I_н \mp \frac{E\gamma}{2L_2 f}.$$

Критический ток нагрузки $I_{н.кр}$ через дроссель $Др_2$ и критическую индуктивность $L_{2кр}$ определим из $I_{Др2\min} = 0$:

$$I_{н.кр} = E\gamma/(2L_2 f), \quad L_{2кр} = E\gamma/(2I_н f).$$

Минимальное и максимальное значения тока через регулирующий ключ и диод

$$I_{K\,\min\,(\max)} = I_{Др1\,\min\,(\max)} + I_{Др2\,\min\,(\max)} =$$

$$= \frac{I_н}{1-\gamma} \mp \left(\frac{E\gamma}{2L_1 f} + \frac{E\gamma}{L_2 f}\right).$$

Для случая $L_1 = L_2 = L$

$$I_{K\,\min\,(\max)} = \frac{I_н}{1-\gamma} \mp \frac{E\gamma}{Lf}.$$

Напряжения, действующие на ключе K и диоде VD в выключенном состоянии,

$$U_K = U_{VD} = U_{C_1} = \frac{E}{1-\gamma}.$$

Пульсации напряжения на выходе регулятора определяются выражением $\Delta U_{C_2} = E\gamma/(8L_2C_2f^2)$.

Внешняя характеристика регулятора с учетом конечных сопротивлений обмоток дросселей $Др_1$, $Др_2$ имеет вид

$$\frac{E\gamma}{1-\gamma} - I_н\left[\frac{r_1\gamma^2}{(1-\gamma)^2} + r_2\right] = U_н,$$

где r_1 и r_2 — сопротивления обмоток соответственно дросселя $Др_1$ и $Др_2$.

Для случая одинаковых дросселей $r_1 = r_2 = r$ регулировочная характеристика имеет вид

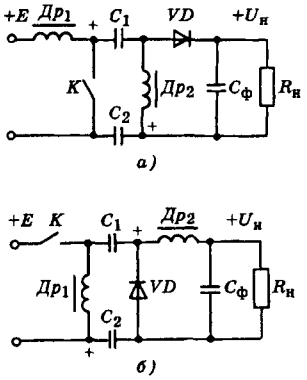


Рис. 37.86. Варианты РНПН с разделительным конденсатором и двумя дросселями

$$\frac{E\gamma}{1-\gamma} - I_н r\left[1 + \frac{\gamma^2}{(1-\gamma)^2}\right] = U_н.$$

Выходное сопротивление регулятора

$$R_{вых} = r_2 + \frac{r_1\gamma^2}{(1-\gamma)^2}.$$

На основе рассмотренного регулятора могут быть построены различные модификации, две из которых показаны на рис. 37.86, *а* и *б*. Обе эти схемы могут быть реализованы с помощью одного двухобмоточного дросселя.

37.20. ОДНОТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ (ОПН)

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

К однотактным относят преобразователи, у которых только на одном интервале времени, входящем в период частоты коммутации, образуется контур, в котором энергия от источника питания передается через силовой транзисторный ключ в обмотку трансформатора.

Существует несколько основных типов ОПН. В одном из них энергия от источника питания передается через трансформатор в нагрузку во время замкнутого состояния транзисторного ключа, управляющего этой передачей, или, как говорят, "в импульсе". Простейшая схема такого ОПН, называемого иногда *ОПНI*, показана на рис. 37.87, *а*, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 37.87, *б*.

В ОПН другого типа энергия от источника питания передается при замкнутом состоянии транзисторного ключа, т. е. на интервале импульса, в обмотку трансформатора и запасается в его магнитном поле, а на другом интервале во время разомкнутого состояния ключа накопленная энергия из магнитного поля трансформатора передается в нагрузку. Схема такого ОПН, часто называемого преобразователем с передачей энергии "в паузе", и диаграммы,

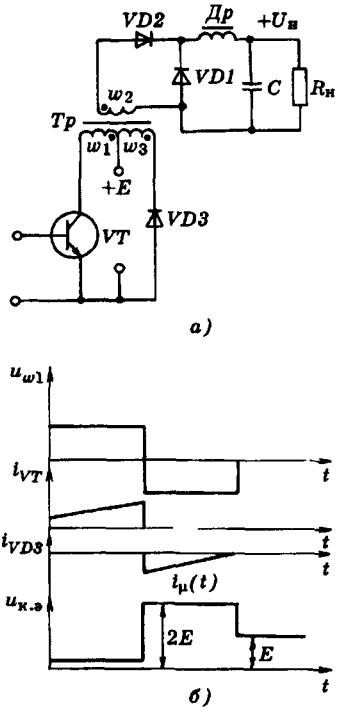


Рис. 37.87. Схема ОПН с передачей энергии в импульсе (*а*) и диаграммы токов и напряжений (*б*)

поясняющие его работу, показаны на рис. 37.88, *а* и *б*. Поскольку такой ОПН по сути дела является импульсным регулятором постоянного напряжения

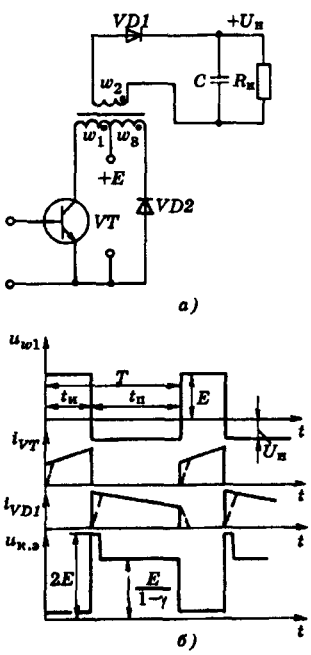


Рис. 37.88. Схема ОПН с передачей энергии в паузе (*а*) и диаграммы токов и напряжений (*б*)

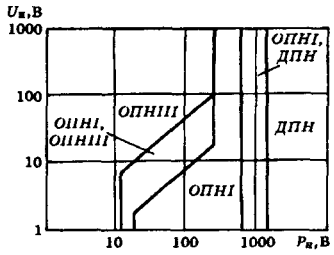


Рис. 37.89. Области целесообразного использования ОПН с передачей энергии в паузе (*ОПНIII*), в импульсе (*ОПНI*) и двухтактных ПН (*ДПН*) в зависимости от мощности $P_н$ и напряжения $U_н$ на нагрузке

III рода с трансформаторным разделением цепей, его иногда называют *ОПНIII*. Существуют также ОПН, в которых энергия передается в нагрузку как во время импульса, так и во время паузы. Такие ОПН, как будет показано ниже, являются комбинацией *ОПНI* и *ОПНIII*.

На рис. 37.89 в координатах выходная мощность $P_н$ — выходное напряжение $U_н$ показаны области, где целесообразно применение основных видов преобразователей — *ОПНIII*, *ОПНI* и *ДПН*. Видно, что *ОПНIII* целесообразно применять при малых мощностях, однако в области повышенных и высоких напряжений граница по мощности сдвигается вправо. При $P_н$ порядка десятков и сотен ватт более предпочтительными становятся *ОПНI*, а при $P_н$ около 1 кВт и выше — *ДПН*.

ОПН С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСЕ

При включенном транзисторе *VT* (рис. 37.87, *а* и *б*) энергия от источника питания *E* через трансформатор и диод *VD2* поступает в нагрузку и идет на накопление энергии в индуктивности дросселя фильтра. При выключенном транзисторе *VT1* энергия, накопленная в индуктивности дросселя отдается в нагрузку через шунтирующий диод *VD1*, а энергия, накопленная в индуктивности намагничивания трансформатора, возвращается в первичный источник напряжения *E* через обмотку w_3 и диод *VD3*, за счет чего происходит ограничение перенапряжений на коллекторе *VT1* в момент его выключения.

Регулировочная характеристика *ОПНI* в режиме непрерывного тока в дросселе фильтра:

$$U_н = E\gamma n,$$

где $n = w_2/w_1$; $\gamma = t_и/T$.

Отличием *ОПНI* от *РНI* является только наличие трансформатора. Поэтому все соотношения, полученные ранее для РНI, справедливы и для *ОПНI*. Основное внимание уделим анализу работы трансформатора.

Наличие трансформатора ограничивает возможный диапазон изменения коэффициента γ, который обычно не превышает $\gamma_{max} = 0{,}5$; на практике $\gamma_{max} \le 0{,}45$.

При работе преобразователя в режиме стабилизации выходного напряжения справедливо соотношение $E_{min}\gamma_{max} = E_{max}\gamma_{min}$ и, следовательно,

$$\gamma_{min} = \frac{E_{min}}{E_{max}}\gamma_{max}.$$

Коэффициент трансформации трансформатора может быть определен по соотношению

$$n = \frac{E_{min}\gamma_{max}}{U'_н},$$

где $U'_н$ — напряжение, превышающее $U_н$ примерно на 1,5 В и учитывающее потери напряжения в диодах *VD1*, *VD2*, в обмотках дросселя и трансформатора.

Число витков первичной обмотки трансформатора

$$w_1 = \frac{E_{max} f_{max}}{\Delta B_{max} S f},$$

где S — сечение магнитопровода; ΔB_{max} — максимальное изменение индукции в сердечнике трансформатора; f — рабочая частота. Для большинства ферритовых магнитопроводов, если не применяются специальные меры, $\Delta B_{max} \le 0{,}2$ Тл.

С целью уменьшения возможного перенапряжения на коллекторе транзистора *VT1* выбираем $w_3 = w_1$. Эти обмотки наматываются одновременно в два провода.

Определив w_1, найдем

$$w_2 = w_1 n.$$

Индуктивность первичной обмотки

$$L_\mu = \frac{\mu_a \mu_0 w_1^2 S}{l},$$

где μ_a — усредненная магнитная проницаемость при изменении индукции на ΔB_{max}; l — средняя длина магнитопровода.

Максимальное значение тока намагничивания в первичной обмотке трансформатора

$$I_{\mu\,max} = \frac{E_{max}\gamma_{min}}{L_\mu f}.$$

Обычно $I_{\mu\,max}$ составляет $5 \div 10$ % тока первичной обмотки трансформатора. Объем магнитопровода трансформатора определим из соотношения

$$E = \frac{w_1 \Delta B_{max} S}{\gamma T} = \frac{L_\mu I_{\mu\,max}}{\gamma T},$$

откуда $w_1 \Delta B_{max} S = L_\mu I_{\mu\,max}$.

Возводя в квадрат обе части равенства и учитывая соотношение для L_μ, находим соотношения для расчета объема магнитопровода

$$V = Sl = \frac{\mu_0 \mu_a L_\mu I_\mu^2}{\Delta B_{max}^2}.$$

ОПН С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ В ПАУЗЕ

Как уже отмечалось выше, работа ОПН с передачей энергии в паузе, схема которого и диаграммы, поясняющие работу, показаны на рис. 37.84, *а* и *б* соответственно, практические ничем не отличается от работы регулятора напряжения III рода с трансформаторным разделением входных и выходных цепей. Поэтому регулировочная характеристика в режиме непрерывного тока

$$\frac{U_п}{E} = \frac{n\gamma}{1-\gamma}.$$

Значения $I_{1\,min}$, $I_{1\,max}$ в обмотке w_1

$$I_{1\,min\,(max)} = \frac{nI_н}{1-\gamma} \mp \frac{E\gamma}{2L_1 f}.$$

Напряжения на транзисторе и на диоде при их разомкнутом состоянии

$$U_K = E + U_н/n;$$

$$U_{VD} = U_н + nE.$$

С целью определения критических значений тока и индуктивности первичной обмотки полагаем $I_{1\,min} = 0$. Отсюда

$$I_{н.кр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2L_1 fn}; \quad L_{кр} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{2I_н fn}.$$

Если ток нагрузки $I_н < I_{н.кр}$ при заданной индуктивности L_1 или $L_1 < L_{кр}$ при заданном токе нагрузки, то преобразователь переходит в режим прерывистого тока. Регулировочная характернстика в этом случае может быть найдена из вышеприведенных соотношений в предположении, что $I_{1\,min} = 0$:

$$\frac{U_н}{E} = \gamma\sqrt{\frac{1}{2\tau_{L_н} f}},$$

где $\tau_{L_н} = L_1/R_н$.

Критнческое значение

$$\gamma_{кр} = 1 - n\sqrt{2\tau_{L_н} f}.$$

Регулировочная характеристика в режиме прерывнстого тока изображена на рис. 37.90, *а* для двух значений $\tau_{L_н}$ штриховыми лнниями. Из последнего выражения можно получить соотношение

$$U_н/E = \gamma^2/(2L_1 I_н f/E),$$

являющееся внешней характеристикой идеального РНIII в режиме прерывистого тока. Внешние характеристики для разных γ показаны на рис. 37.90, *б* сплошными линиями в области *1*.

Внешняя характеристика в режиме непрерывного тока при учете сопротивлений обмоток трансформатора

$$\frac{U_н}{E} = \frac{R_н\gamma(1-\gamma)n}{R_н(1-\gamma)^2 + r_1\gamma n + r_2(1-\gamma)}.$$

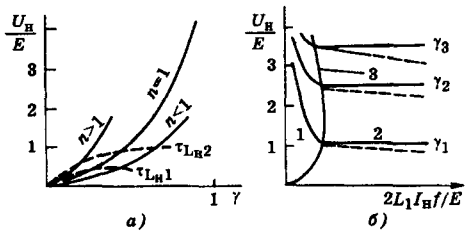


Рис. 37.90. Регулировочные характеристики ОПН с передачей энергии в паузе при различных значениях n в режиме непрерывного (сплошные) и прерывистого (штриховые линии) токов (*а*) и внешние характеристики ОПН с передачей энергии в паузе при различных γ в режиме прерывистого (область *1*) и непрерывного (область *2*) токов. Граничная линия *3* определяется формулой для $I_{н.кр}$ в тексте (*б*)

Эти внешние характеристики показаны на рис. 37.90, *б* штриховыми линиями.

Дифференцируя это выражение по γ, можно показать, как и в случае РНП, что существует некоторое γ^*, при котором $U_н/E = f(\gamma)$ достигает максимума, после чего при $\gamma \to 1$ монотонно стремится к нулю.

Поскольку в рассматриваемом ОПН ток намагничивания равен среднему значению тока в обмотке w_1, т. е. $I_\mu = I_н n/(1-\gamma)$, объем магнитопровода в *ОПНIII* будет всегда больше, чем в *ОПНI*, при прочих равных условиях.

Из-за неполной магнитной связи между первичной и вторичной обмотками ток во вторичной обмотке при выключении регулирующего транзистора *VT* изменится скачком не может. Поэтому на коллекторе *VT* возможно появление сильных перенапряжений, способных вывести транзистор из строя. Для их устранения вводятся рекуперационная обмотка $w_3 = w_1$ и диод *VD2*. Обмотки w_3 и w_1 наматываются одновременно в два провода для обеспечения между ними полной магнитной связи.

Коэффициент трансформации $n = w_2/w_1$ в режиме стабилизации выходного напряжения можно выбрать различными путями. При этом следует иметь в виду, что увеличение длительности проводящего состояния транзистора и уменьшение длительности работы диода приводит к резкому возрастанию потерь мощности и к снижению КПД преобразователя. Поэтому обычно на практике $\gamma \le 0{,}5$.

Следовательно

$$n = U_н/(U_{K\,max} - E_{max});$$

$$\gamma_{max} = (U_{K\,max} - E_{max})/(U_{K\,max} - E_{max} + E_{min}),$$

где E_{min}, E_{max} — минимальное и максимальное значения входного напряжения; $U_{K\,max}$ — максимальное допустимое напряжение на коллекторе *VT*.

ОПН С ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСЕ И В ПАУЗЕ

Как уже указывалось, ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе основан на объединении свойств *ОПНI* и *ОПНIII*. Такое объединение позволяет существенно улучшить характеристики преобразователя.

Возможно несколько вариантов построения ОПН рассматриваемого типа. Схема одного из них показана на рис. 37.91, *а*, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 37.91, *б*. В установившемся режиме конденсатор *C* заряжен с показанной на рисунке полярностью до некоторого уровня, зависящего от напряжения *E* и относительного времени проводящего состояния γ транзистора *VT1*. Транзисторы *VT1*, *VT2* включаются противофазно, т.е если включен *VT1*, то *VT2* выключен н наоборот На нитервале, когда включен *VT1*, наличие элементов *C*, *VT2*, *VD3*, *VD2* не сказывается и преобразователь по своей структуре является полным аналогом *ОПНI*. На этом интервале, обозначенном $t_и$, энергия от источника питания передается в нагрузку, а также накапливается в магнитном поле обмотки дросселя и трансформатора. При выключении транзистора *VT1* и включении *VT2* возникает структура, аналогичная *ОПНIII*. На интервале $t_п$, когда включен *VT2*, энергия, накопленная в индуктивности намагничивания трансформатора, передается через диод *VD2* в нагрузку. При этом ток, равный разности тока намагничивания трансформатора и при-

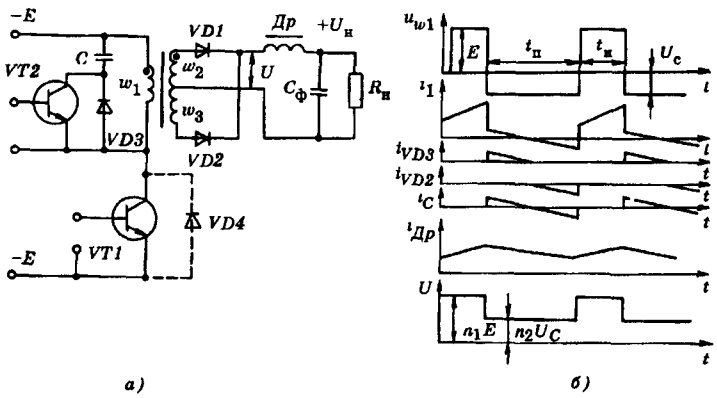


Рис. 37.91. Схема ОПН с передачей энергии в импульсе и в паузе (*а*) и диаграммы токов и напряжений (*б*)

веденного к первичной обмотке тока дросселя, замыкается через конденсатор C. Этот разностный ток в течение первой половины проводящего состояния $VD2$ замыкается через диод $VD3$, а в течение второй половины — через транзистор $VT2$. Как следует из рис. 37.91, *б*, в кривой напряжения U_1, действующего на входе сглаживающего фильтра, имеются ступеньки, высота которых зависит от соотношения коэффициентов трансформации $n_1 = w_2/w_1$ и $n_2 = w_3/w_1$. Такая форма напряжения позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели сглаживающего фильтра. Среднее напряжение U_C на конденсаторе C и регулировочная характеристика ОПН характеризуются выражениями

$$U_C/E = \gamma/(1-\gamma);$$

$$U_н/E = (n_1+n_2)\gamma.$$

Минимальные и максимальные токи в обмотках дросселя и трансформатора

$$I_{Др\,min\,(max)} = I_н \mp \frac{(n_1E-U_н)\gamma}{2L_{Др}f}.$$

$$I_{1\,min\,(max)} = n_2 I_н \mp \frac{E\gamma}{2L_1 f}.$$

Минимальное и максимальное значения тока через транзистор $VT1$

$$I_{VT1\,min\,(max)} = n_1 I_{Др\,min\,(max)} + I_{1\,min\,(max)}.$$

Напряжения на транзисторах $VT1$, $VT2$ и диодах $VD3$, $VD2$, $VD1$ в выключенных состояниях равны:

$$U_{K\,VT1} = U_{K\,VT2} = U_{VD3} = \frac{E}{1-\gamma};$$

$$U_{VD1} = (n_1+n_2)\frac{E\gamma}{1-\gamma};$$

$$U_{VD2} = (n_1+n_2)E.$$

Расчетная мощность регулирующего транзистора $VT1$

$$P_K = \frac{P_н}{\gamma(1-\gamma)}.$$

Полагая $I_{1\,min} = 0$, $I_{Др\,min} = 0$, находим критические значения индуктивностей, соответствующие переходу к режиму прерывистого тока:

$$L_{1\,кр} = \frac{E\gamma}{2n_2 I_н f};$$

$$L_{Др.кр} = \frac{E\gamma[n_1-(n_1+n_2)\gamma]}{2I_н f}.$$

Введение диода $VD4$, показанного на рис. 37.91, *а* штриховой линией, позволяет исключить режим прерывистого тока в обмотке w_1 и переводит преобразователь в обратный режим. В этом режиме преобразователь поддерживает уровень выходного напряжения и при холостом ходе на выходе.

Двойная амплитуда пульсаций напряжения на конденсаторе C

$$\Delta U_C = \frac{I_{C\,max}}{2C}\frac{(1-\gamma)T}{2} = \frac{E\gamma(1-\gamma)}{8f^2C} \times$$

$$\times\left\{\frac{1}{L_1} - \frac{n_2[n_1-(n_1+n_2)\gamma]}{L_{Др}}\right\}.$$

Двойная амплитуда пульсаций напряжения на выходе преобразователя, т. е. на конденсаторе $C_ф$,

$$\Delta U_{C_ф} = \frac{E\gamma[n_1-(n_1+n_2)\gamma]}{8L_{Др}C_ф f^2}.$$

Нетрудно видеть, что $\Delta U_{C_ф} = 0$ при $\gamma = \frac{n_1}{n_1+n_2}$. При изменении γ в определенном диапазоне можно за счет соответствующего выбора коэффициентов n_1 и n_2 существенно снизить пульсации выходного напряжения. Для получения хорошей магнитной связи между обмотками целесообразно выбрать $n_1 = n_2 = n$. Тогда $\Delta U_{C_ф} = 0$ при $\gamma = 0{,}5$. Коэффициент трансформации при изменении входного напряжения от E_{min} до E_{max} и $\gamma = 0{,}5$

$$n = \frac{U_н}{2}\left(\frac{1}{E_{min}} + \frac{1}{E_{max}}\right).$$

ОДНОТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ С МАГНИТНО-СВЯЗАННЫМИ ДРОССЕЛЯМИ

Преобразователи напряжения с магнитно-связанными дросселями (МОПН) разработаны с целью существенного снижения массы и габаритных размеров реактивных элементов.

В МОПН в принципе возможно полное устранение пульсаций тока в обмотках дросселя, а следовательно, и пульсаций выходного напряжения. К настоящему времени разработано много различных преобразователей, в которых использованы полезные свойства магнитно-связанных цепей. Однако все их многообразие сводится к двум способам приведения к нулю пульсаций тока в обмотках дросселя, которые условно будем называть последовательной и параллельной компенсацией.

МОПН с последовательной компенсацией. Схема МОПН с последовательной компенсацией пульсаций показана на рис. 37.92. Достоинствами данного МОПН являются: широкий диапазон регулирования уровня выходного напряжения; высокий КПД; непрерывность потребления энергии от первичного источника напряжения и непрерывность передачи энергии в нагрузку; исключение несимметричной работы трансформатора; возможность сведения к нулю пульсаций выходного напряжения или пульсаций входного тока.

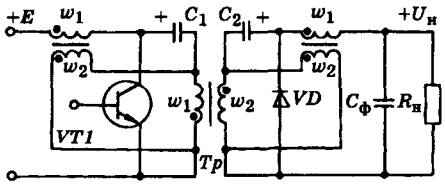


Рис. 37.92. ОПН с магнитно-связанными дросселями и последовательной компенсацией пульсаций

Работа МОПН, показанного на рис. 37.92, практически ничем не отличается от работы рассмотренного регулятора с конденсаторным разделением входных и выходных цепей. Справедливыми остаются и все основные соотношения для РПН с конденсаторным разделением цепей. Напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 при $n = 1$ определяются из выражений

$$U_{C_1} = E; \quad U_{C_2} = \frac{E\gamma}{1-\gamma}.$$

Регулировочная характеристика МОПН, как и для РНПП, имеет вид

$$U_н/E = \gamma/(1-\gamma).$$

МОПН с параллельной компенсацией. Схема МОПН с параллельной компенсацией пульсаций показана на рис. 37.93. В отличие от МОПН с последовательной компенсацией в данной схеме возможно одновременно свести к нулю пульсации выходного напряжения и пульсации входного тока.

Напряжения на конденсаторах и регулировочная характеристика такие же, как и в ОПН с последовательной компенсацией пульсаций.

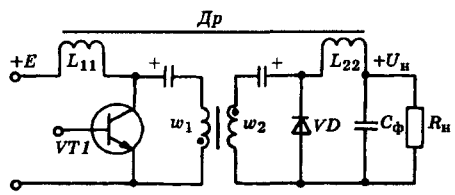


Рис. 37.93. ОПН с магнитно-связанными дросселями и параллельной компенсацией пульсаций

37.21. ДВУХТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ (ДПН)

РАЗНОВИДНОСТИ ДПН

Двухтактными называют преобразователи постоянного напряжения, в которых на периоде частоты коммутации имеются два интервала, на которых в контур, образованный обмоткой (обмотками) трансформатора и силовыми транзисторными ключами, входит источник питания, причем магнитный поток в трансформаторе на этих двух интервалах изменяется в противоположную сторону. В результате при нормальном установившемся режиме сердечник трансформатора перемагничивается по симметричному частному циклу. Такие преобразователи называются для краткости ДПН.

Если с помощью преобразователя осуществляется регулирование мощности, передаваемой в нагрузку (чаще всего широтно-импульсное — ШИР, реже частотно-импульсное — ЧИР), ДПН называют регулирующим. По способу управления ключевыми приборами, которые в дальнейшем называем силовыми транзисторными ключами (СТК), различают ДПН автогенераторного типа и с внешним управлением. В первом случае сигналы управления СТК формируются цепью положительной обратной связи (ПОС), чаще всего трансформаторной. Во втором — специальными устройствами управления, являющимися внешними по отношению к силовой части ДПН.

По способу соединения первичной обмотки трансформатора с СТК различаются: а) ДПН с первичной обмоткой, имеющей вывод средней (нулевой) точки, и двумя СТК (рис. 37.94, *а*), через которые секции этой обмотки w_{11} и w_{12} поочередно подключаются к источнику питания; б) ДПН мостового типа (рис. 37.94, *б*), в которых первичная обмотка трансформатора в нечетные такты работы через два СТК из четырех, соединенных по схеме моста, подключается началом к первой шине питания, а концом — ко второй, а в четные такты подключение обмотки обратное и осуществляется через два других СТК; в) ДПН полумостового типа (рис. 37.94, *в*), где один вывод первичной обмотки имеет связь с шинами питания через конденсаторы, а другой вывод поочередно по тактам соединяется с

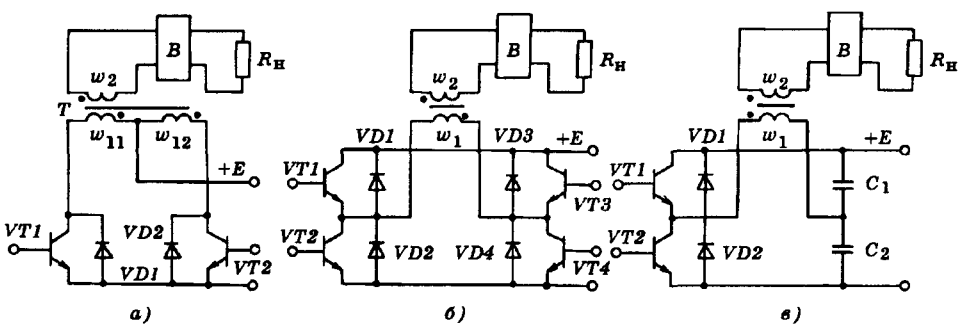


Рис. 37.94. Варианты выполнения силовой части ДПН

а — с первичной обмоткой трансформатора, имеющей средний вывод; *б* — по мостовой схеме; *в* — по полумостовой схеме

первой шиной питания через первый СТК и со второй шиной — через второй СТК. На рис. 37.94 под B понимается выпрямитель, выполненный по мостовой схеме, хотя при низком выходном напряжении часто применяется также выпрямитель с выводом нулевой точки обмотки w_2.

За время каждого такта в сердечнике трансформатора накапливается энергия магнитного поля. Для ее вывода в источник питания и для исключения перенапряжений на СТК в моменты из запирания во всех перечисленных схемах ДПН используется включение диодов VD встречно-параллельно СТК ("обратные" или "рекуперационные" диоды).

ПРОСТЕЙШИЙ АВТОГЕНЕРАТОРНЫЙ ДПН

Одна из наиболее простых схем ДПН автогенераторного типа представлена на рис. 37.95. Цепь обратной связи образована обмоткой $w_{ПОС}$ и элементами R_2, *VD1*, *VD4*. Для возбуждения генерации служит резистор R_1, через который в базу *VT1* от источника питания E задается отпирающий ток смещения. При отпирании *VT1* к первичной обмотке w_{11} прикладывается напряжение, которое трансформируется в обмотку $w_{ПОС}$ и вызывает появление тока через R_2 и тем самым увеличение тока базы *VT1*. Это увеличивает коллекторный ток *VT1* и, как следствие, напряжение на обмотке $w_{ПОС}$. Таким образом, процесс отпирания силового транзистора происходит лавинообразно. В результате транзистор переходит в режим насыщения.

После перехода транзистора в состояние насыщения он удерживается в этом состоянии, пока выполняется неравенство

$$I_{Б1} = I_{ПОС} \geq i_{КТ}(f)/B_1,$$

где B_1 — коэффициеит передачи по току транзистора при его включении по схеме с общим эмиттером, а токи

$$I_{ПОС} = \frac{n_{ПОС}(E - U_{К,Э1}) - U_{Б,Э1} - U_{VD4}}{R_2};$$

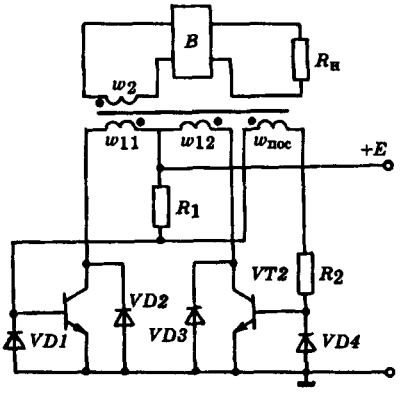


Рис. 37.95. Автогенераторный ДПН по схеме с первичной обмоткой трансформатора, имеющей средний вывод

$$i_{К1}(t) = \frac{H(t)l_c}{w_1} + n_{ПОС}I_{ПОС} + n_2 i_2(t).$$

Здесь $n_{ПОС} = w_{ПОС}/w_1$; $U_{К,Э1}$ — падение напряжения между коллектором и эмиттером силового транзистора в режиме насыщения; $U_{Б,Э1}$ — падение напряжения в его входной цепи; U_{VD4} — падение напряжения на диоде *VD4*, шунтирующем входную цепь транзистора *VT2*, находящегося в состоянии отсечки; $H(f)$ — мгновенное значение напряженности поля в сердечнике трансформатора; l_c — средняя длиа магнитной линии в сердечнике; $n_2 = w_2/w_1$ — коэффициент трансформации обмотки на вторичной стороне трансформатора; $i_2(t)$ — мгновенное значение тока этой обмотки.

Значение $i_{К1}(t)$ будет возрастать вследствие увеличения $H(t)$ по мере перемагничивання сердечника под действием напряжения E, приложенного к первичной обмотке w_{11}. При насыщении сердечника $H(t)$ стремительно возрастает, соответственно возрастает $i_{К1}(t)$, что выводит транзистор из режима насыщения. При этом увеличивается $U_{К,Э1}$, следствием чего является уменьшение тока базы. Это, в свою очередь, вызывает еще большее увеличение $U_{К,Э1}$ и т.д. Происходит снова лавинообразный процесс, в ходе которого уменьшаются базовый и коллекторный токи транзистора *VT1*.

Иивереия зиака напряжения на обмотке $w_{ПОС}$ приводит к появлению отпирающего сигнала во входной цепи *VT2* и запирающего во входной цепи *VT1*. За время такта, составляющего половину периода T работы преобразователя, изменение индукции равно $2B_s$ и, следовательно, $T/2 = 2B_sSw_1/E$

Поскольку амплитудное значение коллекторного тока транзисторов в моменты переключения зависит от усилительного параметра B конкретных приборов, который от образца к образцу имеет значительный технологический разброс, в ДПН по схеме рис. 37.95 возможиы существенные перегрузки силовых транзисторов по току. Для их исключения иногда осуществляют синхронизацию ДПН внешиими импульсами, период повторения которых меньше длительности такта работы схемы.

АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ ДПН С ВНУТРЕННЕЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Избежать перегрузки по току силовых транзисторов в момеит переключеиия возможно за счет такой синхронизации ДПН, при которой сигнал для запираиия проводящего в данном такте силового транзистора вырабатывается в момент, когда его ток достигает некоторого порогового значения. Возможные варианты схем, обеспечивающие управляемое синхроимпульсами запирание СТК, представлены на рис. 37.96—37.98.

В устройстве по рис. 37.96 внешний сигнал синхронизации подается на базу транзистора *VT1*. Его эмиттерным током отпираются транзисторы *VT2*,

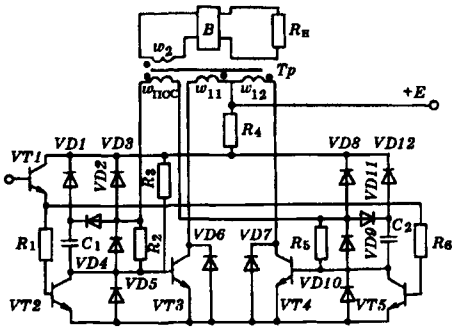


Рис. 37.96. Схема для запирания силовых транзисторов путем шунтирования их входных цепей

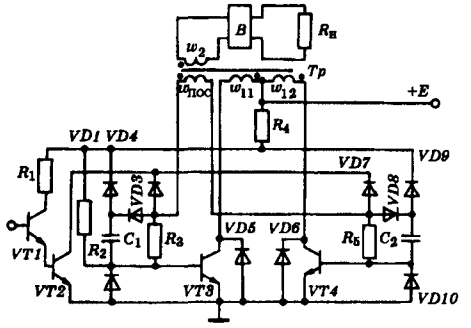


Рис. 37.97. Цепь запирания силовых транзисторов за счет формирования отрицательного тока базы

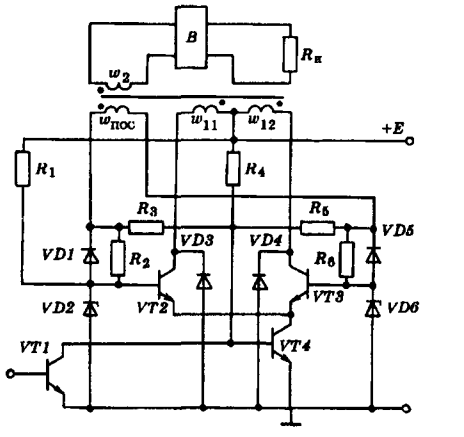


Рис. 37.98. Цепь запирания силовых транзисторов прерыванием их эмиттерного тока (запирание по эмиттеру)

VT5, шунтирующие входные цепи силовых транзисторов *VT3*, *VT4*, что обеспечивает их запирание в конце каждого такта. Источником, обеспечивающим необходимый для их запирания ток, служит обмотка цепи ПОС, напряжение которой выпрямляется диодами *VD3*÷*VD5*, *VD8*÷*VD10*. После того, как один из силовых транзисторов выходит из насыщения и напряжение на обмотках трансформатора начинает уменьшаться по абсолютному значению, источником энергии, обеспечивающим продолжение процесса запирания, становятся заряженные конденсаторы C_1, C_2. Их подзаряд током обмотки цепи ПОС одновременно форсирует процесс отпирания того силового транзистора, который должен перейти в проводящее состояние в очередном такте работы ДПН.

Не останавливаясь детально на методике определения параметров элементов цепи запирания, следует только отметить, что токоограничивающие резисторы R_1, R_6 целесообразно рассчитывать из условия протекания по ним тока

$$I_{R_1} \geq (1{,}5 \div 2) I_{\text{ПОС}} / B_2,$$

где $I_{\text{ПОС}}$ — базовый ток силовых транзисторов, необходимый для их насыщения и обеспечиваемый цепью ПОС; B_2 — коэффициент передачи по току шунтирующих транзисторов *VT2*, *VT5*. Затем по I_{R_1} находим сопротивление R_1 (или R_6) по соотношению

$$I_{R_1} = \frac{1}{R_1} [n_{\text{ПОС}}(E - U_{\text{К,Э3}}) - U_{VD10} - U_{VD9} - U_{VD3} - U_{\text{К,Э1}} - U_{\text{Б,Э2}}],$$

в котором учтены падения напряжения на входной и выходной цепях соответствующих транзисторов в режиме насыщения и прямые падения напряжения на диодах. Без существенной погрешности при оценочных расчетах можно принять $U_{\text{К,Э}} = 0{,}5$ В, $U_{\text{Б,Э}} = U_{VD} \approx 1$ В.

Цепь запирания силовых транзисторов, представленная на рис. 37.97, обеспечивает во время действия синхроимпульса прерывание тока цепи ПОС и задание вместо него запирающего тока в базовую цепь силового транзистора, находящегося в данном такте в состоянии проводимости.

В представленной на рис. 37.98 схеме ДПН реализован принцип эмиттерного запирания силовых транзисторов, который, как известно, является эффективным способом устранения явления вторичного пробоя и повышения надежности работы ключевых схем. Этот способ, кроме того, позволяет существенно сократить продолжительность процесса запирания транзистора и тем самым уменьшить в нем коммутационные потери.

АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ ДПН С МАГНИТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ НА ПЕРВИЧНОЙ СТОРОНЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Возрастание коллекторного тока СТК, обусловленное насыщением сердечника трансформатора ДПН, происходит весьма быстро. Однако от момента формирования сигнала запирания до начала спада коллекторного тока биполярного транзистора проходит время, определяемое скоростью вывода и рассасывания накопленного заряда и составляющее единицы микросекунд. Из-за этой задержки при запирании транзистора коллекторный ток успевает существенно возрастн против порогового значения.

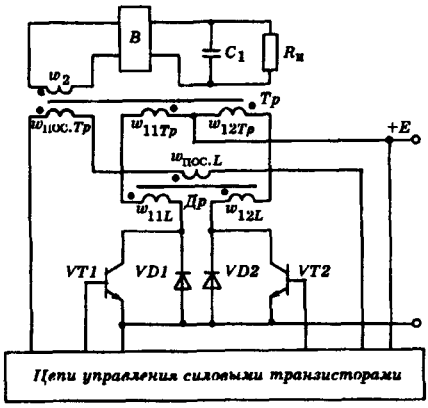


Рис. 37.99. Схема подключения обмоток магнитного накопителя на первичной стороне автогенераторного ДПН

Для гарантированной защиты силовых транзисторов от перегрузки по току необходимо снизить темп роста коллекторного тока при насыщении сердечника силового трансформатора. Один из возможных путей для достижения этой цели использование на первичной стороне трансформатора магнитного накопителя переменного тока (МНПТ). Конструктивно он может быть выполнен в виде отдельного дросселя *Др*, обмотки которого включаются согласно с первичными обмотками силового трансформатора (рис. 37.99).

Для напряжений на первичной стороне ДПН справедливо уравнение

$$U_{1L}+U_{1Tp} = w_{1L}(d\Phi_L/dt)+w_{1Tp}(d\Phi_{Tp}/dt) =$$

$$= E-U_к \approx E,$$

где w_{1L}, w_{1Tp} — числа витков первичных обмоток магнитного накопителя и трансформатора; $U_к$ — падение напряжения на СТК в состоянии проводимости. При совмещении конструктивно накопителя и трансформатора $w_{1L} = w_{1Tp} = w_1$.

Если вторичная обмотка w_2 через выпрямитель B подключена к нагрузке, шунтированной конденсатором фильтра, то в течение времени, пока по этой обмотке замыкается ток, $e_2 = -w_2(d\Phi_{Tp}/dt) = -(U_н+U_B)$, где $U_н$ — напряжение на нагрузке, U_B — падение напряжения на выпрямителе.

Тогда

$$L_1(dI_L/dt) = E-U_к-(U_н+U_B)/n_2 \approx E-U_{1Tp}.$$

Для трансформатора справедливо соотношение

$$I_1 = \frac{H_{Tp}\,l_{Tp}}{w_{1Tp}} = I_{ПОС}n_{ПОС\,T}+I_2w_2,$$

в котором первое слагаемое — ток намагничивания трансформатора, второе — ток цепи ПОС, трансформируемый в первичную обмотку, третье — приведенный к первичной обмотке ток вторичной обмотки трансформатора. Аналогичное соотношение может быть записано для токов в дросселе

$$I_1 = I_L+I_{ПОС}n_{ПОС\,L}.$$

Целесообразно коэффициенты трансформации обмотки ПОС на дросселе и трансформаторе делать одинаковыми. В этом случае независимо от распределения напряжений U_{1L}, U_{1Tp} между первичными обмотками дросселя и трансформатора напряжение $U_{ПОС}$ на соединенных последовательно обмотках $w_{ПОС\,L}$, $w_{ПОС\,Tp}$ будет определяться только состоянием проводящего ток СТК. Это следует из выражения $U_{ПОС} = U_{1L}n_{ПОС\,L}+U_{1Tp}n_{ПОС\,T}$, которое при

$$n_{ПОС\,L} = n_{ПОС\,Tp} = n_{ПОС}$$

записывается в виде

$$U_{ПОС} = n_{ПОС}(U_{1L}+U_{1Tp}) = n_{ПОС}(E-U_к).$$

Теперь находим

$$n_2I_2 = I_L-\frac{H_{Tp}l_{Tp}}{w_{1Tp}} = I_L-I_{\mu\,Tp},$$

где $I_{\mu\,Tp}$ — ток намагничивания. Обычно выбирают параметры трансформатора так, чтобы $I_{\mu\,Tp} \ll I_L$. Тогда

$$I_2 \approx I_L/n_2,$$

где

$$I_L = (E-U_к-U_{1Tp})t/L_1 \approx \frac{E-U_{1Tp}}{L_1}.$$

Эти выражения справедливы при ненасыщенном сердечнике трансформатора. Состоянию насыщения соответствует $(d\Phi_{Tp}/dt)\to 0$, т. е. $U_{1Tp}\to 0$ и $U_2\to 0$. Это означает, что ток во вторичной обмотке падает до нуля и тем самым передача энергии в нагрузку прекращается.

Промежуток времени Δt_{Tp}, в течение которого сердечник трансформатора не насыщен и через него передается энергия в нагрузку, зависит от напряжения $U_{1Tp} = (U_н+U_B)/n_2$:

$$\Delta t_{Tp} = 2B_{sTp}S_{Tp}w_{1Tp}/U_{1Tp},$$

где S_{Tp} — сечение магнитопровода, на котором намотаны вторичные обмотки; B_{sTp} — индукция насыщения трансформатора.

В зависимости от значения U_{1Tp} возможны три режима работы ДПН.

Анализ показывает, что режим работы реализуется, если $E/(1+F) \le U_{1Tp} \le E$, где

$$F = L_1I_{Lm}/2B_{sTp}S_{Tp}w_{1Tp}.$$

При работе в этом режиме выходная характеристика ДПН, связывающая между собой средние значения тока и напряжения на нагрузке, определяется выражением

$$I_н = \frac{I_{Lm}(E/U_{1Tp})(E/U_{1Tp}-1)}{F(1+2F)},$$

где $I_{Lm} = I_{1m} - n_{\text{пос}} I_{\text{пос}}$; $U_{1Tp} = (U_{\text{н}} + U_B)/n_2$, а длительность полупериода

$$T/2 = (2B_{sTp} S_{Tp} w_{1Tp} + 2L_1 I_{Lm})E.$$

При напряжении

$$U_{1Tp} = U^*_{1Tp} = E/(1+F),$$

соответствующем границе режима 1, ток, отдаваемый в нагрузку,

$$I_{\text{н}} = \frac{I_{Lm}}{2n_2} \frac{1+F}{1+2F}.$$

Режим 2 характеризуется тем, что переход сердечника трансформатора в состояние насыщения происходит после того, как ток на первичной стороне достигнет значения I_{1m}, и устройство управления выключит соответствующий транзистор. Второй режим возникает, если

$$E(\sqrt{1+F^2} - F) \le U_{1Tp} \le E/(1+F).$$

При работе ДПН в режиме 3 насыщение сердечника вообще не происходит. Поэтому ток, передаваемый во вторичную обмотку, линейно нарастает до момента, пока на первичной стороне ток не достигнет значения I_{1m} и устройство управления не выключит соответствующий транзистор (например, *VT1* в схеме рис. 37.99). Как и для режима 1, после запирания *VT1* из магнитного накопителя начинает выводиться энергия. При этом ток протекает по обмотке w_{12Tp} в том же направлении, в каком до запирания *VT1* ток протекал по обмотке w_{11Tp}. В силу этого направление тока $i_2 = I_{Lm}/n_2 - (E+U_{1Tp}) \times t/(n_2 L_1)$ на вторичной стороне трансформатора не изменяется. Таким образом, при работе ДПН в режиме 3 ток вторичной обмотки имеет треугольную форму с амплитудой

$$I_{2m} = I_{Lm}/n_2.$$

Вследствие этого среднее значение тока нагрузки при переходе в режим 3 работы ДПН перестает зависеть от напряжения на нагрузке и нагрузочная характеристика схемы записывается в виде

$$I_{\text{н}}(U_{\text{н}}) = \text{const} = I_{Lm}/2n_2,$$

если

$$U_{1Tp} = (U_{\text{н}} + U_B)/n_2 \le E(\sqrt{1+F^2} - F).$$

Длительность полупериода в режиме 3

$$\frac{T}{2} = \frac{2L_1 I_{Lm}}{E} \Big/ [1 - (U_{1Tp}/E)^2].$$

На рис. 37.100 представлены нагрузочные характеристики, построенные в относительных единицах при нескольких значениях параметра F. Участки характеристики, соответствующие второму режиму работы, показаны штриховыми линиями.

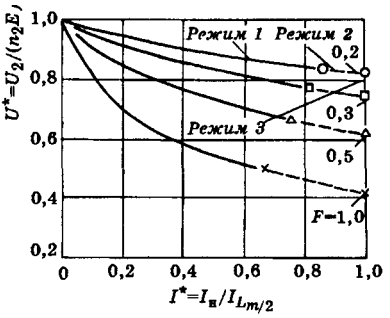


Рис. 37.100. Нагрузочные характеристики автогенераторного ДПН с МНПТ

Чтобы увеличить передаваемую в нагрузку мощность $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$, целесообразно при проектировании ДПН выбирать его параметры так, чтобы $F \le 0{,}2 \div 0{,}3$. Следует однако иметь в виду, что уменьшению F соответствует увеличение $S_{Tp} w_{1Tp}$, т.е. увеличение размеров силового трансформатора.

ДПН С ВНЕШНИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Силовая схема ДПН с внешним управлением не отличается от схемы автогенераторного ДПН. Если каждый из силовых транзисторов *VT1* и *VT2* отпирать сразу после запирания предыдущего, ДПН по отношению к нагрузке будет источником постоянного напряжения $(n_2E - U_B)$. Если в каждом такте отпирание одного СТК задерживать по отношению к моменту запирания другого на регулируемое время $t_{\text{п}}$, то напряжения на вторичных обмотках трансформатора будут равны n_2E на интервалах проводимости СТК $t_{\text{и}}$ и близки к нулю во время пауз $t_{\text{п}}$. Поэтому ДПН с таким способом управления и при включении на выходе выпрямителя фильтра с дроссельным входом обладают такой же регулировочной характеристикой, как преобразователь напряжения с передачей энергии в импульсе при широтно-импульсном регулировании

$$U_{\text{н}} = \gamma(n_2E - U_B),$$

где $\gamma = t_{\text{и}}/(t_{\text{и}} + t_{\text{п}})$.

Для ДПН с внешним управлением характерно существование двух опасных режимов. Первый из них — периодические КЗ на первичной стороне, возникающие на интервалах времени, когда одновременно в состоянии проводимости оказываются два СТК, принадлежащие к разным плечам двухтактной схемы (*VT1* и *VT2* на рис. 37.94, *а*—*в*).

Второй нежелательный режим, возможный в ДПН с внешним управлением, — режим несимметричного намагничивания сердечника силового трансформатора, приводящий к его насыщению и связанным с этим перегрузкам СТК по току. Имеются различные способы устранения нежелательных режимов.

37.22. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В ИВЭП, выполненных на основе импульсных регуляторов и преобразователей, стабилизация выходного напряжеиия осуществляется изменением относительной длительности γ проводящего состояния регулирующего прибора (транзистора), называемого далее регулирующим ключом *РК*. В таких ИВЭП возможно широтно-импульсное, частотно-импульсное и позиционное (иначе, следящее, релейное) регулирование. Наиболее широко распространены ИВЭП с широтно-импульсным регулированием, в которых при постоянной частоте коммутации ($f = 1/T = \text{const}$) изменяется длительность включенного состояния РК.

По способам построения систем управления, обеспечивающих стабилизацию выходного напряжения, различают компенсационные, параметрические и компенсационно-параметрические импульсные стабилизаторы.

Сохранение высокой точности и устойчивой работы при значительном диапазоне изменения входного напряжения достигается применением комбинированных компенсационно-параметрических стабилизаторов. Сущность такой стабилизации сводится к разделению функций отработки различных дестабилизирующих факторов между параметрическим и компенсационным каиалами: параметрический канал должен обеспечивать постоянное среднее значение выходного напряжения регулятора при изменениях E, а компенсационный — отрабатывать сравнительно малые изменения $U_н$, обусловленные изменениями тока нагрузки и характеристик параметрического канала.

На рис. 37.101, *а* представлена схема компенсационио-параметрического стабилизатора с РНІ, в котором в качестве управляемого входным напряжением источника тока используется транзистор *VT*. На рис. 37.101, *б* приведены временные диаграммы, иллюстрирующие работу стабилизатора. На схеме не конкретизировано выполнение задающего генератора, *РК*, компаратора напряжения и усилителя обратной связи. Предполагается, что *РК* управляется сигналами *Вкл.* и *Выкл.* условно изображенными на рис. 37.101, *б*.

Когда *РК* выключен и проводит диод *VD1*, коллекторный ток *VT* замыкается через диод *VD2* и напряжение на кондеисаторе *С* фиксируется на нулевом уровне.

Включение *РК* сигналом от задающего генератора *ЗГ* приводит к запиранию диодов *VD1* и *VD2*. При этом конденсатор *С* начинает заряжаться коллекторным током *VT* и иапряжение на нем увеличивается по линейному закону. Когда U_C станет равно напряжению E_0, на выходе компаратора напряжения *КН* сформируется сигнал на выключение ключа. Поскольку I_C зависит от входного напряжения E, то при изменениях последнего будет обратно пропорционально изменяться время включенного

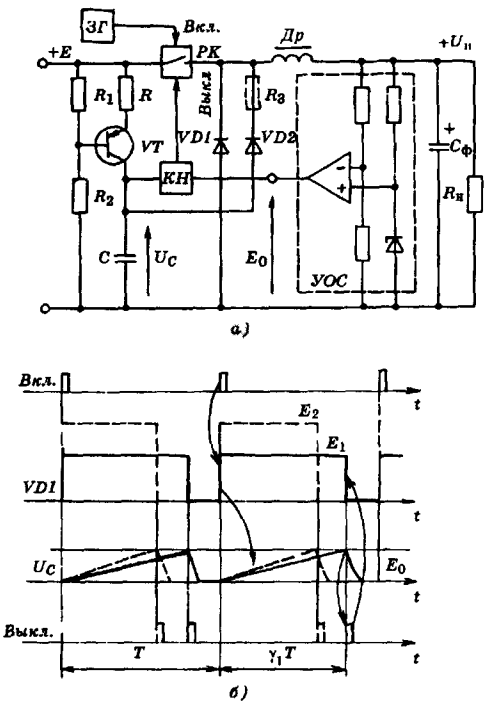


Рис. 37.101. Схема компенсационно-параметрического стабилизатора напряжения на основе РНІ (*а*) и временные диаграммы, иллюстрирующие его работу (*б*)

состояния ключа и тем самым осуществляться стабилизация выходного напряжения.

В рассмотренной схеме автоматическая синхронизация работы ключа и модулятора осуществляется схемой фиксации начального уровня иапряжения на конденсаторе *С* (диод *VD2*), управляемой выходным напряжением ключа. Такое построение схемы управления наиболее целесообразно, так как в этом случае автоматически учитываются задержки переключения реальных ключей.

Согласно принятым на рис. 37.101, *а* обозначениям ток заряда конденсатора определяется соотношением

$$I_C = Ea/R, \quad a = R_1/(R_1+R_2).$$

Учитывая, что $U_{C0} = 0$ и $U_{ср} = E_0$ (напряжение E_0 задается усилителем обратной связи *УОС* компенсационной цепи стабилизации, влияние которой мы пока не рассматриваем), получаем

$$\gamma = E_0 CR/(aTE)$$

С учетом внутренних сопротивлений *РК* и дросселя *Др*, обозначаемых через r, имеем

$$U_н E_0 CR/(aT) - I_н r.$$

Поскольку $\partial U_н/\partial E = 0$, коэффициент стабилизации по входному напряжению равен бесконечности.

Из последнего выражения следует, что при параметрическом способе стабилизации любые измеиеиия величин, характеризующих работу схемы управления, непосредствеино влияют на значение $U_н$, а выходное сопротивление стабилизатора равно выходиому сопротивлению регулятора. Для оценки влияния изменений каждой из величин можно воспользоваться частными производными $\partial U_н/\partial П$, где через $П$ обозначен параметр, влияние которого оцеиивается.

Уменьшеиие зависимости $U_н$ от изменений этих величин и тока нагрузки достигается введением компенсациоиного канала стабилизации. Взаимодействие параметрического и компенсационного каналов должно быть таким, чтобы требуемый закон управления значением γ сохранялся. В рассматриваемой схеме такое взаимодействие осуществляется за счет задания порога срабатывания *КН* с выхода *УОС*.

Учитывая, что $\Delta E_0/\Delta U_н = -K$, где K — коэффициент усиления *УОС* с учетом входного делителя напряжения, можно, дифференцируя последнее соотношение для $U_н$, оценить влияние любого параметра на значение выходного напряжения:

$$\Delta U_н = \frac{(\partial U_н/\partial П)_0 \Delta П}{1+KCR/(aT)}.$$

Здесь $\Delta U_н$ — изменения $U_н$ при изменении параметра иа значение $\Delta П$, а $(\partial U_н/\partial П)_0$ — частная производная, полученная в предположении $E_0 = \text{const}$.

Пусть, например, необходимо оценить влияние изменения тока нагрузки, иными словами найти выходное сопротивление стабилизатора. Учитывая, что $R_{вых} = -\partial U_н/\partial I_н$, находим

$$R_{вых} = r/(1+KCR/(aT)),$$

откуда при заданиом r, определенном ранее при расчете регулятора, можно найти требуемое значение коэффициента усиления.

Следует отметить, что источник тока, обеспечивающий заряд конденсатора C на интервале $t_и$ в схеме на рис. 37.101, *а*, может быть включен после *РК*, для чего верхние выводы резисторов R и R_1 соединяются с катодом диода *VD1*. В этом случае параметрический канал будет также отрабатывать измеиения выходного напряжения, обусловленные падеиием напряжеиия иа *РК*. Подобное же включение можно рекомендовать для стабилизаторов, выполненных иа базе преобразователей напряжения, имеющих аиалогичные внешиие характеристики, в частности для *ОПН1* и *ОПНII*.

Расчет элемеитов системы управления может быть проведеи следующим образом.

Пусть заданы $U_н$, $E_{min}/I_{и\,max}$, T, $R_{вых}$ и предварительным расчетом регулятора определено его выходное сопротивление r. При выбраиной элементиой базе зиачение максимального напряжеиия срабатывания компаратора E_0 вполне определенно, а минимальный коллекториый ток транзистора (ток заряда конденсатора I_C) находится из соображений его температурной стабильности. Поэтому

$$a/R = I_{C_{min}}/E.$$

Чтобы транзистор *VT* в процессе заряда конденсатора C оставался в активном режиме работы, следует задаться минимальным напряжением между коллектором и базой $U_{K\,min}$. После этого можно определить коэффициент

$$a = 1-(E_0+U_{K\,min})/E_{min}.$$

Из двух последних соотношений находим

$$R = (E_{min}-E_0-U_{K\,min})/I_{C_{min}}.$$

Затем определяем емкость

$$C = TI_{C_{min}} \frac{U_н+rI_{н\,max}}{E_0 E_{min}}.$$

Коэффициент усиления *УОС* можно найти, если задано суммарное допустимое изменение выходного напряжения ΔU_Σ при воздействии различных дестабилизирующих факторов. При этом могут быть вычислены изменения соответствующих параметров $\Delta П$. Поскольку ΔU_Σ определяется суммированием приращений $\Delta U_н$, определяемых приращениями различиых влияющих параметров, имеем

$$K = \frac{aT}{CR}\left[\frac{\sum_{П}\left(\frac{\partial U_н}{\partial П}\right)_0 \Delta П}{\Delta U_\Sigma} - 1\right].$$

Практические расчеты показывают, что в реальных устройствах значение K не превышает несколько десятков. Такие небольшне значения коэффициента усиления в цепи обратной связи обусловлеиы наличием параметрического канала стабилизации и способствуют повышению устойчивости в большом диапазоне изменения входного напряжения.

При определении сопротивлений резисторов R_1 и R_2 исходят из соображений наилучшей температурной стабильности эмиттерного тока транзистора *VT*. Обычно полагают $R_1 = R$ и по найденному значению a определяют R_2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

37.1. Чиженко И. М., Рудеико В. С., Сенько В. М. Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980.

37.2. Справочник по преобразовательной технике/Под ред. И. М. Чиженко. Киев: Техніка, 1978.

37.3. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985.

37.4. Полупроводниковые выпрямители. 2-е изд., перераб. / Е.И. Беркович, Ф.И. Ковалев и др. М.: Энергия, 1975.

37.5. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Автоиомные тиристорные инверторы. М.: Энергия, 1967.

37.6. Толстов Ю. Г. Автономные инверторы тока. М.: Энергия, 1978.

37.7. Стабилизированные автономные инверторы с синусоидальным выходным напряжением / Ф. И. Ковалев, Г. П. Мосткова, В. А. Чванов и др. М.: Энергия, 1972.

37.8. Писарев А. Л., Деткин Л. П. Управление тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1975.

37.9. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М.: Энергия, 1977.

37.10. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник / В. В. Бачурнн, В. Я. Ваксенбург, В. П. Дьяконов и др.; Под ред. В. П. Дьяконова. М.: Радио и связь, 1994.

37.11. Поликарпов А. Г., Сергиенко Е. Ф. Однотактиые преобразователи иапряжения в устройствах электропитания РЭА. М.: Радио и связь, 1989.

37.12. Поликарпов А. Г., Сергиенко Е. Ф. Импульсиые регуляторы и стабилизаторы напряжения. М.: Моск. энерг. ин-т, 1983.

37.13. Глебов Б. А. Магнитно-транзисторные преобразователи напряжения для питания РЭА. М.: Радио и связь, 1981.

37.14. Богданов Н. Н. Сетевые преобразователи. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-т, 1990.

37.15. Богданов Н. Н. Автономные преобразователи. М.: Изд-во МЭИ, 1986.

37.16. POWER TRANSISTORS: DATA BOOK, THOMSON COMPONENTS SEMICONDUCTORS, 1986.

37.17. Power MOSFET application and product Data. HDB-4 Fourth egition. International Rectifier HEXFET designer's manual. 233 Kansas st., El Segundo, California, 90245, 1987.

37.18. Power MOSFET Application note ADE-508-001. 3rd Edition, July 1989. Published by: Semiconductor and IC Div. Hitachi, Ltd. Edited by: Application Engineering Dept. Hitachi Microcomputer Engineering, Ltd. Copyright © Hitachi, Ltd, 1985.

37.19. Semiconductors. Bipolar Power Transistor Data. Elbatex, CH5430 Wettingen, Hardstasse 72, © Motorola, Inc. All Rights Reserved. First Edition, 1985. DLE 111/D. Printed in Switzerland.

37.20. Power Applications Manual. Includes literature available at August 1993. All trademarks recognized. © Motorola Inc, All Rights Reserved. First Edition DL 410/D, 1990. DL 410/D Rev. 1, 1993. Printed in Great Britain by Tavictock Press (Bedford) Ltd. 5000 9/93.

37.21. SEMICONDUCTORS HIGHT POWER SEMICONDUCTORS DATA BOOK. April First Edition 1989, Editioned by Committee of editing of Mitsubishi Semiconductor Data Book. Published by Mitsubishi Electric Corp., Semiconductor Marketing Division. © 1989 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Printed in Japan.

37.22. Semiconductors power module data book. December, First Edition 1988. Editioned by Committee of editing of Mitsubishi Semiconductor Data Book. Published by Mitsubishi Electric Corp., Semiconductor Marketing Division © 1988 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Printed in Japan.

37.23. International Rectifier IGBT Designer's Mannual IGBT-2. Second Printing. Published by IR, 233 Kansas st., EL Segundo, California 90245, 1991.

37.24. Semiconductors power module MOS, 1995. New publication, effective Feb. 1995. Specifications subject to change without notice. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. H-DD168-B, FU9605, Printed in Japan (ROD).

37.25. Innovation + service, Power Electronics, Sewikron International, 10.1996, for 1997/98 Ident N° 11224240.

Раздел 38

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

38.1. Общие понятия 498
Определение и классификация химических источников тока (498). Параметры ХИТ (499).
38.2 Первичные ХИТ 500
Классификация первичных ХИТ (500). Первичные ХИТ с водными растворами электролитов (501). Первичные ХИТ с неводными растворами электролитов (503). Первичные ХИТ с расплавленными и твердыми электролитами (505).
38.3. Топливные элементы и электрохимические генераторы 506
38.4. Вторичные ХИТ 507
Кислотные (свинцовые) аккумуляторы и батареи (507). Щелочные аккумуляторы и батареи (509). Воздушно-металлические аккумуляторы (512). Литиевые аккумуляторы (512). Аккумуляторы с твердыми электролитами (512).
Список литературы 512

38.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Химическими источниками тока (ХИТ) называются устройства, в которых химическая энергия активных веществ (окислителя и восстановителя) непосредственно превращается в электрическую энергию.

Основными составными частями ХИТ являются катод, анод и ионный проводник (электролит) между ними. На катоде происходят процессы восстановления окислителя, а на аноде — окисление восстановителя. Электролит представляет собой жидкую или твердую фазу, имеющую ионную электропроводность.

Непосредственное участие в токообразующей реакции в ХИТ принимают активные вещества. Они могут входить в состав катода, анода, электролита, а иногда хранятся вне ХИТ. Совокупность активных веществ и электролита, на основе которых создан ХИТ, называется электрохимической системой этого ХИТ.

Электрохимическая система ХИТ записывается следующим образом: (+) окислитель (электролит), восстановитель (—). Например, электрохимическая система, в которой окислителем является диоксид марганца, восстаиовителем — цинк и электролитом — водный раствор гидроксида калня, в тексте записывается следующим способом:

$$(+)MnO_2\ |KOH|\ Zn(-).$$

Если в состав электролитов ХИТ входят проводники первого рода, не изменяющиеся в ходе реакции, то они также могут записываться при изображении электрохимической системы ХИТ. Например, электрохимическая система, в которой окислителем служит кислород, восстановителем — водород, электролитом — раствор гидроксида калия, а в состав катода и анода входит платина, записывается следующим образом:

$$(+)O_2,\ (Pt)\ |KOH|\ (Pt),\ H_2(-).$$

Химические источники тока подразделяются на первичные и вторичные. Первичиые ХИТ предназначены для разового непрерывного или прерывистого разряда. Первичный ХИТ, состоящий из одиой электрохимической ячейки, называют гальваническим элементом или просто элементом. Если ХИТ состоит из двух и более электрически соединенных элементов, то он называется гальванической батареей. Вторичные ХИТ предназначены для миогократного разряда за счет восстановления его емкости путем заряда электрическим током. Вторичный ХИТ, состоящий из одной электрохимической ячейки, называют аккумулятором, а ХИТ, состоящий из двух и более электрически соединиенных аккумуляторов, — аккумуляторной батареей. Вторичные ХИТ работают поочередно в режиме разряда и заряда. При разряде аккумулятор работает как первичный ХИТ, в процессе разряда происходит превращение химической энергии активных веществ в электрическую энергию, при этом активные вещества превращаются в продукты разряда. При заряде вторичного ХИТ электрическая энергия превращается в химическую энергию активных веществ, соответственно продукты разряда регенерируются в активные вещества.

Особую группу источников тока представляют топливные элементы. Топливным элементом называется источник тока, в котором происходит преобразование химической энергии окислителя и топлива (восстановителя), непрерывно поступающих извне к электродам, в электрическую энергию. В отличие от гальванических элементов активные вещества ие закладываются в топливные элементы, а хранятся вне их и подаются при работе источника тока.

Для увеличения иапряжения и тока топливиые элемеиты электрически соединяют один с другим, при этом получают батарею топливных элементов. Для обеспечения непрерывной работы батареи топливных элементов иеобходимы система подачи окислителя и топлива (восстановителя), отвод продуктов реакции и теплоты. Установка, состоящая из батареи топливных элементов и обслуживающих систем (систем подачи окислителя и восстановителя, отвода продуктов реакции и теплоты и др.), называется электрохимическим генератором (ЭХГ). В

свою очередь, ЭХГ входит в электрохимическую энергоустаиовку, которая кроме ЭХГ содержит системы хранения и обработки окислителя и восстановителя, а иногда систему преобразования напряжения и тока.

ПАРАМЕТРЫ ХИТ

Электродвижущая сила (ЭДС) $E_э$ ХИТ определяется термодинамическими функциями химической реакции, протекающей при разряде ХИТ (токообразующей реакции):

$$E_э = -\Delta G/(n\mathrm{F}),$$

где ΔG — изменение энергии Гиббса токообразующей реакции; F = 96484,56 Кл/моль — число Фарадея; n — число электронов, приходящихся на одну молекулу реагента.

Значение энергии Гиббса можно рассчитать на основании справочных данных о стандартных значениях этой энергии и данных о давлении или активностях активных веществ и продуктов реакции. На основании термодинамических фуикций реакций, протекающих на катоде и аноде, можно также рассчитать равновесные потенциалы этих электродов.

Электродвижущая сила ХИТ равна разности равновесных потенциалов положительного $E^{р}_{(+)}$ и отрицательного $E^{р}_{(-)}$ электродов

$$E_э = E^{р}_{(+)} - E^{р}_{(-)}.$$

Реально устанавливающееся напряжение между выводами ХИТ при разомкнутой внешней цепи называется напряжением разомкнутой цепи

$$U_{р.ц} = E_{(+)} - E_{(-)},$$

где $E_{(+)}$ и $E_{(-)}$ — статические или стационарные потенциалы положительного и отрицательного электродов, которые устанавливаются при отсутствии электрического тока в цепи.

Статический потенциал может быть равен равновесному потенциалу электрода, если на электроде устанавливается равновесие и побочные реакции отсутствуют. В этом случае ЭДС ХИТ равна напряжению разомкнутой цепи.

Однако во многих случаях из-за побочных реакций и других причин равновесие на электроде не устанавливается, и поэтому статический потенциал отличается от равновесного. Соответственно в этом случае напряжение разомкиутой цепи не равно ЭДС ХИТ.

Поляризация и сопротивление. При разряде или заряде ХИТ потенциалы электродов изменяются вследствие поляризации. Поляризацией называется разность между потенциалом электрода при разряде и его значением при равновесии или при стационарном состоянии. Поляризация подразделяется на концентрационную, электрохимическую и химическую.

Концентрационная поляризация возникает вследствие изменения концентрации реагирующих веществ из-за замедленности массопереноса.

Электрохимическая поляризация возникает из-за замедленности переноса электрического заряда в электродной реакции, а химическая — из-за замедленности химических реакций на электроде. Они зависят прежде всего от природы электродной реакции и могут быть уменьшены увеличением поверхности электродов, рабочей температуры элемента, активности или давления реагирующих веществ, а также использоваиием каталитически активных электродов.

Сумма поляризаций катода и анода равна поляризации ХИТ.

Отношение поляризации элемента к проходящему через него току называется поляризациоиым сопротивлением. Поляризационные сопротивления ХИТ при разряде $r_{п.р}$ и заряде $r_{п.з}$ соответствеино равны:

$$r_{п.р} = \Delta E_р / I_р, \quad r_{п.з} = \Delta E_з / I_з,$$

где $\Delta E_р$ и $\Delta E_з$ — поляризации ХИТ при разряде и заряде, $I_р$ и $I_з$ — токи разряда и заряда.

Поляризационное сопротивление не постоянно, оно уменьшается при увеличении тока, протекающего через ХИТ.

Кроме поляризационного ХИТ характеризуется омическим сопротивлением, которое равно сумме омических сопротивлений электролита, электродов и других токоведущих деталей ХИТ. В отличие от поляризационного сопротивления омическое сопротивление ХИТ не зависит от тока.

Сумма омического и поляризационного сопротнвлений называется виутренним сопротивлением ХИТ соответственно при разряде $r_р$ и заряде $r_з$:

$$r_р = r_{п.р} + r_{о.р}, \quad r_з = r_{п.з} + r_{о.з},$$

где $r_{о.р}$ и $r_{о.з}$ — омические сопротивления ХИТ при разряде и заряде.

Напряжение. Разрядным напряжением $U_р$ называется напряжение между выводами ХИТ при его разряде

$$U_р = U_{р.ц} - I_р r_р.$$

Графическое изображение зависимости напряжения ХИТ от тока (внешняя характеристика) получило название вольт-амперной кривой. Она, как правило, имеет нелинейный характер, так как поляризационное сопротивление зависит от тока

В процессе разряда изменяется состав актнвных веществ и электролита, поэтому изменяется и напряжение ХИТ. Графическое изображение изменения разрядного напряжения во времени при постоянном токе получило название разрядной кривой.

Аккумуляторы также характеризуются зарядным напряжением

$$U_з = U_{р.ц} + I_з r_з$$

При постоянном токе зарядное напряжение возрастает по мере заряда. Кривая изменения напряжеиия аккумулятора во время заряда называется зарядной кривой.

Емкость и удельная емкость Емкостью ХИТ называют количество электричества, отдаваемое им

при разряде до достижения конечного напряжения. Если ХИТ разряжается неизменным током $I_р$, то емкость

$$C_I = I_р \tau_р,$$

где $\tau_р$ время разряда до коиечного напряжеиия.

Если ХИТ разряжается при постояином сопротивлении внешией цепи R, то его емкость

$$C_R = \frac{1}{R}\int_0^{\tau_р} U\,d\tau \approx U_{ср}\tau_р/R,$$

где $U_{ср}$ — среднее разрядное напряжение; τ — текущее время разряда.

Номинальной емкостью иазывается заряд, который должен отдавать свежеизготовленный ХИТ при нормальных условиях разряда, указаииых для него. Номинальная емкость аккумулятора определяется при условии, что он был полностью заряжен.

Емкость в ХИТ зависит от его конструкции, запаса активных веществ и режима разряда: тока разряда или сопротивления внешней цепи, характера разряда (прерывистый или продолжительный) и температуры окружающей среды. С увеличением тока разряда или с уменьшеиием сопротивлеиия внешней цепи емкость ХИТ уменьшается, так как при этом возрастают его поляризация и омические потери. Кроме того, при высоких плотиостях тока у некоторых ХИТ уменьшается степень использования активных веществ.

Кривая зависимости емкости ХИТ от температуры обычно имеет максимум. Снижение емкости ХИТ при низких температурах обусловлено увеличением поляризации и омического сопротивления; при высоких температурах ускоряются побочные химические, электрохимические и физические процессы, приводящие к потере активных веществ.

Аккумуляторы характеризуются зарядной емкостью $C_з$, равной количеству электричества, принимаемого ХИТ при заряде. При постоянном токе заряда зарядная емкость

$$C_з = I_з \tau_з,$$

где $\tau_з$ — время заряда.

Мощность и удельная мощность. Мощность ХИТ P равна произведению тока разряда на разрядное иапряжение:

$$P = U_р I_р.$$

Так как с увеличением тока иапряжеиие ХИТ уменьшается, то кривая зависимости мощности от тока проходит через максимум.

Удельной мощностью P_V или P_m называется отношеиие мощности ХИТ соответственно к его объему V или массе m.

Энергия и удельная энергия. Энергией ХИТ называют произведение емкости C на среднее разрядное напряжение $U_{ср}$:

$$W = U_{ср}C.$$

При одном и том же количестве активных веществ энергия ХИТ возрастает с увеличением температуры и уменьшением разрядного тока.

Отношение энергии ХИТ к его объему или массе называют удельной энергией W_V или W_m:

$$W_V = W/V, \quad W_m = W/m.$$

Удельная энергия ХИТ умеиьшается при повышении его удельной мощности.

Для аккумулятора имеет важное зиачеиие энергия, необходимая для его заряда. Отношение энергии аккумулятора, которую он отдает при разряде, к энергии, необходимой для его заряда до первоначального состояния при определенных условиях, называется отдачей по энергии (КПД аккумулятора).

Саморазряд и сохраняемость заряда. Потерю емкости ХИТ, обусловленную протеканием в нем самопроизвольных процессов, называют саморазрядом. Саморазряд вызывается коррозионными процессами, взаимодействием ионов переменной валентности, окислителей и восстановителей с активиыми веществами и т. д. Саморазряд влияет на сохраняемость заряда, под которой понимается способность ХИТ сохранять емкость во время хранения при разомкнутой виешией цепи.

Аккумуляторы характеризуются сроком службы, равным календарной продолжительности эксплуатации в заданных условиях, определяемым промежутком времени, в течеиие которого аккумулятор сохраняет параметры, установленные стандартом или техническими условиями. Иногда срок службы аккумулятора выражается наработкой или техническим ресурсом. Наработка равна числу циклов аккумулятора или батареи при испытании или эксплуатации. Технический ресурс равен числу циклов, которое должны выдерживать аккумулятор или батарея при эксплуатации или испытаниях, пока его емкость не сиизится до доли от номиинальной, установленной в стандарте на аккумулятор или батарею конкретного типа.

Требования безопасности. Для обеспечения безопасности труда конструкция ХИТ должна исключать возможиость вытекания электролитов при наклонах, толчках и вибрациях, а также исключать возможность накопления газов внутри источника тока до взрывоопасного состояиия. Источники тока, при работе которых выделяются вещества, вредные для здоровья, выполняются герметичными. Конструкция заливочных отверстий должна исключать разбрызгиваиие электролита при работе.

38.2. ПЕРВИЧНЫЕ ХИТ

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ ХИТ

По готовиости к работе первичиые ХИТ можио разделить на две группы:

а) элементы и батареи, выпускаемые в состоянии, готовом к эксплуатации;

б) резервные ХИТ, предназначеиные для храиения в неактивированиом состоянии, конструкция которых включает устройство для активироваиия.

В зависимости от природы электролита различают ХИТ с водными и неводными растворами электролитов, с расплавленными и твердыми электролитами.

ПЕРВИЧНЫЕ ХИТ С ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Элементы системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом. Наиболее распространенные элементы изготовляются на основе системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом:

$$(+)\ MnO_2\ |NH_4Cl,\ ZnCl_2|\ Zn\ (-);$$

$$U_{р.ц.} = 1{,}5 \div 1{,}7\ В.$$

Электролит находится в пастообразном состоянии или пропитывает пористую диафрагму. Такой электролит малоподвижен и не растекается, поэтому элементы называются сухими. Токообразующая реакция в элементе с солевым электролитом может быть записана в виде:

$$2MnO_2 + Zn + 2NH_4Cl = Zn(NH_3)_2Cl_2 + 2MnOOH.$$

Сухие элементы с солевым электролитом разделяют на три типа, которые предназначены для следующих интервалов температур:

Универсальный (У) . . . От —40 до +60 °С
Летний (Л) . . . . . От —20 до +60 °С
Тропический (Т) . . . . От —10 до +60 °С

Сухие элементы системы диоксид марганца — цинк имеют цилиндрическую, прямоугольную или дисковую форму. В цилиндрических и прямоугольных элементах цинковый анод одновременно является сосудом ХИТ. Эти элементы называют стаканчиковыми. На рис. 38.1 представлена схема цилиндрического элемента набивного типа, катод которого состоит из активной массы, содержащей диоксид марганца, и угольного стержня. Активная масса подпрессовывается при изготовлении элемента.

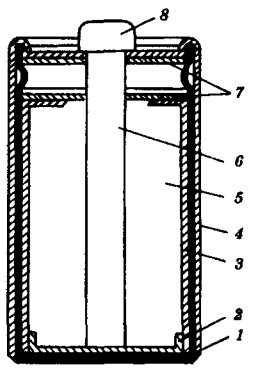


Рис. 38.1. Схема элемента цилиндрического типа с солевым электролитом

1 — отрицательный электрод; *2* — картонная чашечка; *3* — пастовая диафрагма; *4* — футляр с этикеткой; *5* — активная масса положительного электрода; *6* — угольный стержень; *7* — картонные шайбы; *8* — латунный колпачок

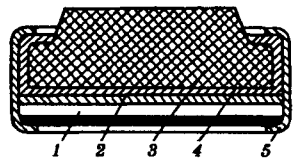


Рис. 38.2. Схема дискового сухого элемента

1 — цинковый электрод с электропроводящим слоем; *2* — активная масса положительного электрода; *3* — диафрагма с пастой; *4* — бумажная прокладка; *5* — кольцо из поливинилхлорида

Анод от катода отделяется диафрагмой, пропитанной раствором электролита. Стаканчиковые элементы также выпускаются с пастообразным электролитом, в который вводятся мука или крахмал.

Дисковые элементы состоят из цинковой пластины, картонной диафрагмы, пропитанной раствором электролита, и спрессованного слоя положительного электрода (рис. 38.2). На внешнюю поверхность анода наносится токопроводящий водонепроницаемый слой из углеродистого материала и связующего. Дисковые элементы соединяют последовательно, полученную батарею изолируют и упаковывают в футляр. Такие батареи называются галетными.

В табл. 38.1 приведены данные элементов и батарей рассматриваемой системы, предназначенных для питания радио-, телефонной, геологоразведочной и другой аппаратуры, карманных фонарей и т. д. Удельная энергия элементов и батарей в зависимости от их конструкции и условий разряда изменяется в пределах 30÷65 Вт·ч/кг и 60÷130 Вт·ч/м^3.

Достоинством ХИТ на основе системы диоксид марганца — цинк с солевым электролитом является их относительно низкая стоимость. К существенным их недостаткам следует отнести значительное изменение напряжения при разряде (рис. 38.3), невысокую удельную мощность (5÷10 Вт/кг) и малую сохраняемость.

Можно снизить расход диоксида марганца и соответственно повысить емкость элемента, если обеспечить доступ воздуха к катоду во время работы ХИТ. В этом случае электрохимическая система такого элемента будет обозначаться диоксид марганца, кислород воздуха — цинк. Параметры элементов такой системы также приведены в табл. 38.1.

Элементы системы диоксид марганца — цинк с щелочным электролитом. Электролитом в этих

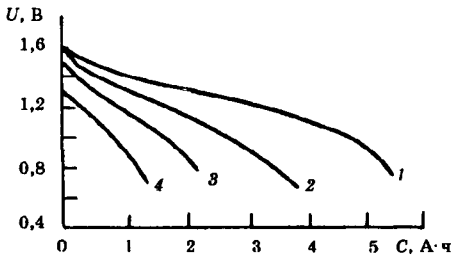


Рис. 38.3. Разрядные кривые элемента 373 с солевым электролитом при 20 °С:

1, 2, 3, 4 — токи разряда соответственно 10, 40, 100, 250 мА

Таблица 38.1. Элементы системы диоксид марганца — цинк и диоксид марганца, кислород воздуха — цинк с солевым электролитом

Обозначение	Размеры, мм				Масса, г	Гарантийный срок хранения, мес	Напряжение свежеизготовленного элемента, В	Сопротивление внешней цепи при измерении напряжений, Ом	Продолжительность работы при 20 °С, мин				Характеристики режима разряда				
									свежеизготовленных элементов		в конце гарантийного срока хранения		Непрерывный разряд		Прерывистый разряд		
	Длина	Ширина	Высота	Диаметр					при непрерывном разряде	при прерывистом разряде	при непрерывном разряде	при прерывистом разряде	Сопротивление внешней цепи, Ом	Конечное напряжение, В	Сопротивление внешней цепи, Ом	Конечное напряжение, В	Периодичность разряда
283	—	—	44,5	10,5	10	3	1,48	50	1 200	4 320	960	2 880	200	1,0	300	0,9	12 ч в день ежедневно
314	—	—	38,0	14,5	15	6	1,52		2 280	4 500	1 800	3 600					
316	—	—	50,5	14,5	20	9	1,52		3 600	10 800	2 880	6 000					
332	—	—	37,3	21,5	30	6	1,40	10	360	100	288	80	20	0,85	5	0,75	5 мин в день, 5 дней в неделю; 10 мин в день, 5 дней в неделю
336	—	—	60,0	21,5	30	6	—		600	400	420	170					
343	—	—	50,0	26,2	50	18	1,50		720	300	540	200					
373	—	—	61,5	34,2	115	18	1,55	—	2 400	1 100	1680	690	—	—	—	—	30 мин в день, 5 дней в неделю
374	—	—	75,0	34,2	130				3 000	1 300	2 100	720					
376	—	—	91,0	34,2	165				3 900	1 700	2 730	1 115					
425	—	—	100	40,0	235	15	1,48	—	8 640	—	6000	—	—	—	—	—	—
465	—	—	125	51,0	502	18	1,50		29 700		20 400						
145Л	42	42	102	—	300	12	1,48	20	9 600	—	780	—	20	0,85	—	—	—
145У						18	1,60										
165Л	57	57	132	—	700	21	1,50	10	33 000	—	24 000	—	20	0,85	—	—	—
165У							1,66										
0,45	57	57	132	—	600	15	1,3	10	33 000	—	24 000	—	10	0,7	—	—	—
076	82	82	176	—	1700	18		5	48 000		3 600		5				
1,28-НВМЦ-525П	160	160	185	—	6500	15	1,28	2	1 100 ч	1 200 ч	—	840 ч	2	0,8	5,5	0,95	4 ч в день
1,28-НВМЦ-525	—	—	—	—	—	—	—	—	—	665 ч	—	500 ч			2,0	0,85	

Примечания: 1. Элементы 045, 076, 1,28-НВМЦ-525П и 1,28-НВМЦ-525 — системы диоксид марганца, кислород воздуха — цинк, остальные элементы — системы диоксид марганца — цинк.

2. Размеры элементов 425 и 465 указаны без футляра.

3. Элементы 045, 076, 1,28-НВМЦ предназначены для работы при температуре не ниже —10 °С; элементы 145Л и 165Л — от —17 до +60 °С, элементы 145У и 165У — от —40 до +60 °С. Продолжительность работы свежеизготовленных элементов 286, 314, 316, 332, 336, 343, 373, 374 и 376 при —40 °С должна быть не менее 5% номинальной, элементов 145Л при —17 °С и элементов 145У при —40 °С — не менее 37,5% номинальной, элементов 165Л при —10 °С и 165У при —40 °С — не менее 20% номинальной.

элементах служит 30÷40% раствор гидроксида калия, пропитывающий пористую диафрагму или смешанный до пастообразного состояния с крахмалом.

Токообразующая реакция в элементе

$$2MnO_2 + Zn + H_2O = 2MnOOH + ZnO.$$

Для увеличения поверхностн анода цинк применяют в виде пасты или прессованного порошка. Элементы имеют стальной корпус н выполняются в дисковом (пуговичном) либо в цилиндрическом виде. Напряженне элементов с щелочным электролнтом изменяется при разряде значительно меньше, чем у элементов с солевым электролнтом (рис. 38 4). Элементы с щелочным электролитом имеют более высокие удельную энергню (65—90 Вт·ч/кг н 100÷150 кВт ч/м^3) и сохраняемость, чем элементы с солевым электролитом Данные некоторых элементов и батарей, применяемых для питания аппаратов связи, малогабаритной радио- н другой аппаратуры приведены в табл 38 2

Элементы системы кислород воздуха, MnO_2 — *цинк.* Окислителем в элементе служит кислород воздуха и MnO_2, электролитом — раствор щелочн. Токообразующая реакция записывается уравненнем

$$O_2 + 2Zn + 4OH^- + 2H_2O = 2[Zn(OH)_4]^{2-}.$$

Восстановление кислорода происходит на каталитнчески активном порнстом электроде, содержащем гидрофобизатор (парафин, каучук или полнэтилен).

На рис 38.5 прнведена схема одного нз элементов батареи "Корунд-ВУ". Анодом в элементе служнт порошок цинка, катодом — прессованная смесь активированного угля, диоксида марганца, ацетиленовой сажи н гидрофобизатора. Электролнт состоит из раствора гидроксида калня, загущенного крахмалом и мукой. Размеры батарен 48,5×17,5×26,5 мм, масса 40 г. Свежепрнготовленная батарея имеет напряжение 9 В, в конце гарантнйного срока хранения (9 мес.) — 8 В. Продолжнтельность работы при прерывистом режиме разряда (4 ч в суткн, сопротивление внешней цепи 900 Ом и конечное напряжение 5,4 В) составляет 80 ч для свежепрготовленной батареи и 44 ч в конце гарантнйного срока хранения. Батарея работоспособна в интервале температур от —10 до +50 °С. Удельная энергия батареи 150÷200 Вт·ч/кг

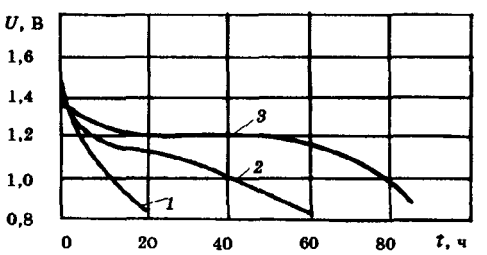


Рис. 38.4. Разрядные кривые сухих элемеитов: масса элементов 16 г, нагрузка 25 мА, температура 21 °С

1 — MnO_2 |NH_4Cl| Zn; *2* — MnO_2 |KOH| Zn; *3* — HgO |KOH| Zn

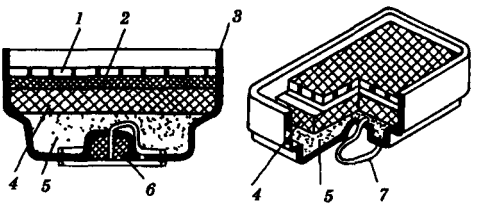


Рис. 38.5. Схема элемента батареи "Корунд ВЦ"

1 — токоотвод; *2* — положительный электрод, *3* — корпус из винипласта; *4* — диафрагма; *5* — активная масса отрицательного электрода; *6* — изолирующий слой; *7* — токоотвод отрицательного электрода

Резервные ХИТ. В завнсимости от способа активации резервные ХИТ подразделяются на водоактивируемые, ампульные, газоактивируемые и тепловые ХИТ. Водоактивируемые ХИТ приводятся в действие путем подачн к электродам воды, ампульные — путем подачи к электродам электролита, находящегося в отдельных ампулах. Тепловые ХИТ приводятся в действие расплавлением твердого электролита путем его нагревания. Предложено также актнвнрование ХИТ подводом газов, напрнмер аммиака или хлора.

В источнике тока системы хлористая медь — магний после актнвирования водой протекает основная реакцня

$$2CuCl + Mg = 2Cu + MgCl_2.$$

Батарен элементов этой системы прнменяются для питания радиозондов, плавучих бакенов, спасательного оборудования, переносных сигнализацнонных устройств. Показатели батареи этой снстемы 200ПМХМ-2 приведены в табл. 38.3.

Водоактивируемый ХИТ системы хлорнд свинца — магнний также применяется для питания радиозондов, радиоаппаратуры и переносного оборудования. Токообразующая реакция в ХИТ

$$PbCl_2 + Mg = Pb + MgCl_2$$

Показатели некоторых ХИТ этой системы приведены также в табл. 38.3.

В ампульных резервных ХИТ электролнтом служит раствор хлорной, борфтористоводородной или кремнефторнстоводородной кислоты либо раствор щелочн. Элементы с хлорной кислотой имеют свинцовый анод и катод из диоксида свинца. Напряженне разомкнутой цепн 1,85÷2,3 В, рабочее напряжение 1,6÷2,1 В. Удельная энергия ХИТ 20÷40 Вт·ч/кг и 50÷100 кВт·ч/м^3. Разработаны н другие ампульные резервные ХИТ.

ПЕРВИЧНЫЕ ХИТ С НЕВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

В последние годы ведется разработка новых электрохимических систем элементов. В качестве активного материала анода нашел применение литий, в качестве актнвных матерналов катода — оксид меди CuO, диоксид марганца MnO_2, фторуглерод $(CF)_n$, диоксид серы SO_2, тионилхлорид $SOCl_2$ н

Таблица 38.2. Элементы и батареи системы диоксид марганца — цинк с щелочным электролитом

Обозначение	Торговое название	Размеры, мм				Масса, г	Гарантийный срок хранения, мес.	Характеристики при непрерывном разряде свежеизготовленных элементов при 20 °С		Характеристики при прерывистом разряде и 20 °С*				Режим прерывистого разряда (5 дней в неделю)	
		Длина	Ширина	Высота	Диаметр			Напряжение, В, при сопротивлении 10 Ом	Продолжительность работы при сопротивлении 200 Ом до напряжения 0,85 В, ч	Свежеизготовленные элементы		После гарантийного срока хранения		Сопротивление, Ом	Конечное напряжение, В
										Напряжение, В	Продолжительность работы, ч	Продолжительность работы, ч	Продолжительность работы в сутки, ч		
А332	"Ореол"	—	—	37,3	21,5	35	6	1,38	15	—	2/3,3	1,5/2,5	0,08	5	0,75
А336	"Свет"	—	—	60,0	21,5	55	6	1,38	40	—	7/8,3	3,7/6,7	0,17	5	0,75
А343	"Салют"	—	—	50,5	26,2	70	12	1,38	50	—	8,3/12,5	6,7/10,0	0,17	5	0,75
А373	"Мир"	—	—	61,5	34,2	140	12	1,40	100	—	30/36,7	23,0/28,3	0,5	5	0,75
	"Рубин"	63,0	23,0	67,0	—	150	6	—	—	3,8	10,0	7,5	0,17	15	2,25
	"Рубин-1"	63,0	22,0	67,0	—	150	9	—	—	4,2	75,0	60	4	100	2,7
	"Финиш"**	26,0	21,0	69,0	—	58	9	—	—	9,5	90,0	60	4 (15 суток, затем 2 ч)	900	5,6

* В числителе указаны характеристики элементов обычного исполнения, в знаменателе — исполнения "экстра".

** Система диоксид марганца, кислород воздуха — цинк.

Таблица 38.3. Резервные ХИТ систем хлорид свинца — магний и хлорид меди —магний

Обозначение	Размеры, мм			Масса, г		Сопротивление внешней цепи, Ом	Напряжение, В			Продолжительность работы при температуре —15÷+25 °С, с	Гарантийный срок хранения, мес.	Время достижения начального напряжения с момента включения, мин
	Длина	Ширина	Высота	в сухом состоянии	в замоченном состоянии		начальное	максимальное	конечное			
6ПМХС-0,5	35	33	48	39	50	8,62	1,5	6,0	4,0	0,5	15	15
12ПМХС-0,5	46	36	49	68	83	3,50	6,0	12,7	10,0	0,5	18	5
7ПМХС-3,5	114	48	112	750	900	—	—	7,0	—	2,5	—	—
7ПМХС-12	202	104	106	2300	2800	4,0	—	7,0	—	4,0	—	—
80ПМХС-М-2ч	95	58	58	275	320	5000 / 13,0	75 / 2,4	90 / 3,3	75 / 2,4	2,0	30	20
200ПМХМ-2	150	125	80	650	850	7700	—	200	—	2,0	—	—

Примечания: 1. ПМХС — приборный ХИТ системы магний—хлорид свинца, ПМХМ — приборный ХИТ системы магний — хлорид меди.

2. Для ХИТ 80ПМХС-М-2ч (ТУ 16-729.133-78) электрические параметры приводятся для цепи анода (числитель) и цепи накала (знаменатель).

3. Рабочий интервал температур от —50 до +50 °С.

др. Ионными проводниками в элементах с такими системами служат неводные растворы электролитов, так как в водных растворах электролитов литий неустойчив. На основе электрохимических систем с литиевым анодом разработано несколько видов элементов, которые выпускаются большими сериями.

В качестве растворителей в таких элементах обычно используются органические соединения: пропиленкарбонат, бутиролактон, тетрагидрофуран и др. Растворителями также служат некоторые неорганические соединения, например, $SOCl_2$, которые одновременно являются и активными веществами (окислителями). Ионная проводимость обеспечивается введением в растворитель солей, имеющих анионы больших размеров, например, $LiClO_4$, $LiAlCl_4$, $LiBF_4$. Удельная электрическая проводимость неводных растворов электролитов на один-два порядка ниже проводимости водных растворов электролитов. Кроме того, катодные процессы в них обычно протекают медленно. Поэтому в элементах с неводными электролитами плотности тока невелики (порядка 1 мА/см^2). Исключение составляют элементы с окислителем SO_2 и особенно $SOCl_2$, в которых удалось достигнуть более высоких плотностей тока.

Достоинством элементов с неводными электролитами и литиевыми анодами является высокая удельная энергия (табл. 38.4).

К важным достоинствам элементов с неводными электролитами следует отнести их способность сохранять приемлемые параметры при отрицательных температурах. Элемент на основе системы SO_2—Li при —40 °С имеет емкость, равную 65% емкости при +20 °С.

К недостаткам элементов с неводнымн электролитами следует отнести относительно высокую стоимость, обусловленную высокой ценой лития и некоторыми особыми требованиями к их производству

Таблица 38.4. Некоторые элементы с неводными электролитами и литиевыми анодами

Окислитель в системе элемента	Напряжение разомкнутой цепи, В	Рабочее напряжение, В	Удельная энергия при 20 °С	
			Вт·ч/кг	кВт·ч/м^3
MnO_2	3,0	3÷2,7	До 300	До 500
CuO	2,5	1,8÷1,5	200÷300	470
$(CF)_n$	3,3	2,8÷2,2	200÷300	450÷500
SO_2	2,9	2,8÷2,2	200÷350	500
$SOCl_2$	3,5	3,5÷3,0	300÷500	650÷1000

(необходимость инертной атмосферы, очистки неводных растворителей).

Элементы с неводными электролитамн находят применение для питания клавишных ЭВМ, переносной радноаппаратуры, часов, фото- и киноаппаратуры и других малогабаритных устройств. Они перспективны для питания средств медицинской техники, в частности, для питания вживляемых кардиостимуляторов.

ПЕРВИЧНЫЕ ХИТ С РАСПЛАВЛЕННЫМИ И ТВЕРДЫМИ ЭЛЕКТРОЛИТАМИ

Тепловые ХИТ. Высокой ионной проводимостью обладают расплавленные электролиты. Поэтому ХИТ с такими электролитами могут работать при высоких плотностях тока. В таких ХИТ можно применять восстановители, которые неустойчивы в водных растворах. Практическое применение нашли резервные ХИТ, активируемые нагреванием, в процессе которого происходит плавленне электролита, находящегося в твердом состоянии в соприкосновении с электродами.

В тепловых элементах и батареях анодами служат кальций, магний или сплавы лития, активным веществом катода — оксиды тяжелых металлов (вольфрама), хроматы кальция, калия, цинка, сульфиды железа и др. В качестве электролита применяется смесь галогенидов щелочных металлов, например LiCl—KCl.

Источник тока включает в себя пиротехнические средства для расплавления электролита и другие составные части. В качестве примера приведем элемент

$$(+)CaCrO_4\ |KCl,\ LiCl|\ Ca(-).$$

Напряжение элемента при 480÷500 °С равно 2,0÷2,5 В. Элемент обычно используется в составе батареи из последовательно соединенных элементов. Тепловые батареи имеют высокую удельную мощность (до 600 Вт/кг), могут работать в широком интервале температур окружающей среды (—70÷ +70 °С). Однако продолжительность их разряда (обычно 1÷15 мин) и удельная энергия (3÷ 10 Вт·ч/кг) невелики.

Первичные ХИТ с твердыми электролитами. Вещества, обладающие ионной проводимостью в твердом состоянии, называются твердыми электролитами. Ионная проводимость их обусловлена наличием ионных дефектов (вакансий) в узлах кристаллической решетки. В последние годы открыты твердые электролиты, имеющие высокую ионную проводимость при невысоких температурах. Например, ионная проводимость электролита $RbAg_4I_5$ при 25 °С составляет 26 См/м.

На основе твердых электролитов разрабатываются первичные ХИТ, обладающие сохраняемостью 10 лет и более. Анодами в этих элементах служат серебро, медь, литий и другие металлы, окислителями — йод и его соединения, а также некоторые органические вещества. Практическое применение нашли, например, элементы $Li|LiI|I_2$, поливиниламинопиридин.

Элементы разряжаются очень малыми токами, поэтому срок их службы может достигать 10 лет. Элемент имеет высокую удельную энергию — до 200 Вт·ч/кг. Элементы с твердыми электролитами нашли применение для питания малогабаритных устройств, в том числе в медицине для вживляемых кардиостимуляторов.

38.3. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В топливном элементе (ТЭ) происходит непосредственно процесс преобразования химической энергии в электрическую, поэтому батарея ТЭ является главной составной частью электрохимического генератора (ЭХГ). Электроды ТЭ при работе не расходуются, к ним непрерывно подводятся окислитель и восстановитель (топливо). На катоде восстанавливается окислитель, на аноде окисляется восстановитель. Для ускорения процессов окисления и восстановления применяют каталитические активные электроды с высокоразвитой поверхностью. Ионным проводником в ТЭ служат либо водные растворы щелочей и кислот, либо расплавленные или твердые электролиты.

Кроме природных видов топлива, таких как углеводороды, в ТЭ могут быть использованы получаемые из них вещества: метанол и водород. Окислителем обычно служит кислород воздуха.

Так как реагенты хранятся вне ТЭ, то эти источники тока не характеризуются разрядной кривой и емкостью.

Батарея ТЭ, системы подвода реагентов, отвода теплоты и продуктов реакции, а также автоматики входят в состав ЭХГ, последний вместе с системами хранения реагентов — в состав электрохимической энергоустановки. Электрохимическая энергоустановка характеризуется напряжением, мощностью, энергией и удельной энергией, КПД и ресурсом.

Под КПД понимается отношение электрической энергии, отдаваемой энергоустановкой, к химической энергии, подводимой к установке. Ресурсом электрохимической установки называется продолжительность работы в заданных пределах параметров.

Наиболее разработаны ТЭ и ЭХГ на основе электрохимической системы кислород (воздух) — водород.

Кислородно (воздушно)-водородные ТЭ и ЭХГ. Токообразующей реакцией в кислородно-водородном элементе является реакция окисления водорода:

$$O_2 + 2H_2 = 2H_2O.$$

Катализаторами кислородного электрода служат уголь, серебро, платина, оксиды никеля и кобальта, катализаторами водородного электрода — платина и палладий, никель, карбид вольфрама и др. В качестве электролита низко- (100 °С) и среднетемпературных (200 °С) ТЭ используются растворы гидроксида калия, фосфорная кислота, ионообменные мембраны. Кроме электродов и электролита ТЭ обычно имеют другие части: анодную и катодную камеры, устройства для отвода теплоты, токосъемники, прокладки. В состав некоторых ТЭ входят пористые пластины для электролита, фитиль для отвода воды и т. д. Напряжение воздушно-кислородных элементов различных фирм и организаций лежит в пределах 0,8÷0,9 В при плотности тока 0,1÷0,2 А/см^2 и температуре 80÷90 °С.

На основе ТЭ созданы ЭХГ мощностью от сотен ватт до 11 МВт. Электрохимические генераторы нашли применение для питания аппаратуры космических кораблей и станций: "Джемини", "Аполлон", "Шаттл" и др. Электрохимический генератор для космического корабля "Аполлон" имел мощность 0,56÷2,3 кВт и напряжение 31÷21 В. Генератор питал корабль электроэнергией и водой. Потребление водорода и кислорода составляло 0,36 кг/(кВт·ч), удельная энергия всей энергоустановки при полете корабля на Луну составляла 0,86 кВт·ч/кг.

В России созданы ЭХГ космического назначения мощностью до 30 кВт.

Энергоустановки с использованием углеводородов и угля. Природные углеводороды и уголь пока не могут быть непосредственно использованы в ТЭ, работающем при температуре ниже 500 °С, так как скорость их анодного окисления мала. Поэтому они предварительно подвергаются переработке с целью получения водорода или смеси водорода с другими

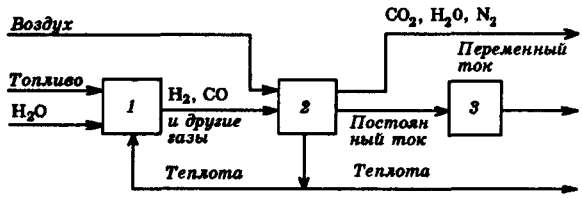


Рис. 38.6. Схема электрохимической энергоустановки
1 — блок аппаратов для обработки топлива; *2* — ЭХГ; *3* — инвертор

газами. Природный газ, например, подвергают конверсии водяным паром в присутствии катализаторов. Реакция происходит в две стадии:

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2,$$

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Уголь обрабатывают водяным паром или смесью водяного пара и кислорода. Основными продуктами этих реакций являются водород и оксид углерода.

Продукты переработки углеводородов или угля затем подаются в среднетемпературный или высокотемпературный ЭХГ. Среднетемпературный ЭХГ имеет воздушно-водородный ТЭ с фосфорнокислым электролитом, работающий при 200 °С. В высокотемпературных ЭХГ применяются ТЭ либо с расплавленным, либо с твердым электролитом. Расплавленный электролит состоит из смеси карбонатов натрия, лития и калия. Элемент с таким электролитом работает при 600÷700 °С. Твердым электролитом ТЭ служит смесь диоксида циркония ZrO_2 и триоксида иттрия Y_2O_3. Элементы работают при 1000 °С.

Кроме блока аппаратов для обработки углеводородов и ЭХГ энергоустановка может иметь инвертор. Схема энергоустановки приведена на рис. 38.6. Созданы и испытаны установки мощностью от 12 кВт до 11 МВт, работающие на природном газе. КПД этих установок составляет 38÷45%. Кроме электроэнергии электрохимические установки генерируют теплоту, которая может быть использована на теплофикацию, для генерации пара или для генерации электроэнергии в паровых или газовых турбинах. При этом суммарный КПД установок существенно возрастает. Например, КПД по электроэнергии электрохимической электростанции, в которой теплота ЭХГ используется в паротурбинном цикле, может достигать 50÷60%, а суммарный КПД с учетом теплофикации — 80÷90%.

38.4. ВТОРИЧНЫЕ ХИТ

Выпускаемые промышленностью вторичные ХИТ подразделяются на кислотные и щелочные. Ведется разработка новых аккумуляторов с щелочными, неводными, расплавленными и твердыми электролитами. На рис. 38.7 приведены удельные параметры некоторых аккумуляторов.

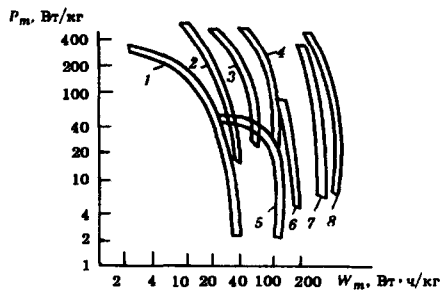


Рис. 38.7. Удельные энергия и мощность аккумуляторов
1 — свинцовых; *2* — никель-кадмиевых; *3* — никель-цинковых; *4* — серебряно-цинковых; *5* — воздушно-железных; *6* — воздушно-цинковых; *7* — серно-натриевых; *8* — серно-литиевых

КИСЛОТНЫЕ (СВИНЦОВЫЕ) АККУМУЛЯТОРЫ И БАТАРЕИ

Аккумуляторы созданы на системе:

$$(+)PbO_2\ |H_2SO_4|\ Pb(-);$$

$$E_э = 2{,}06 \div 2{,}15\ В.$$

Суммарное уравнение обратнмой реакции в свинцовом аккумуляторе имеет вид

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \underset{\text{Заряд}}{\overset{\text{Разряд}}{\rightleftarrows}} 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

Как видно, при заряде на одном электроде (положительном) образуется диоксид свинца, на втором электроде (отрицательном) — свинец. При разряде диоксид свинца и свннец превращаются в сульфат свинца.

Аккумулятор состоит из положительного н отрицательного электродов, раствора серной кислоты (27÷39%) и сепаратора.

Прнменяются два типа электродов: поверхностные и пастированные. Поверхностный электрод состоит из свинцовой пластины, на поверхности которой электрохимически формируется слой активной массы. Пастированные электроды подразделяются на решетчатые (намазные), коробчатые н панцнрные.

В решетчатых (намазных) электродах активная масса удерживается в решетке из свинцово-сурьмяного сплава толщиной 1÷4 мм. В коробчатых пластинах решетки с активной массой закрываются с двух сторон перфорированнымн свинцовыми листамн.

Панцирные пластины состоят из свинцово-сурьмяных штырей, которые помещаются внутри пластмассовых перфорнрованных трубок, заполненных активной массой. Для отрицательных электродов используются намазные и коробчатые пластины, для положительных электродов — поверхностные, намазные и панцирные. В качестве сепараторов прнменяют микропористые пластины из вулканизированного каучука (мипора), поливилхлорида (мипласта), стекловолокна и полиэтилена.

Свинцовые аккумуляторы обычно соединяют в батарею, которую помещают в моноблок из эбонн-

та, пластмассы (термопласта), полипропилена, асфальтопековой композиции, керамики или стекла.

Одной из важнейших характеристик аккумулятора является срок службы (годы) или технический ресурс—наработка (число циклов). Ухудшение параметров аккумулятора и выход их из строя обусловлены в основном коррозией решетки и оползанием активной массы положительного электрода. Срок службы аккумулятора определяется в первую очередь типом положительных пластин и условиями эксплуатации.

Аккумуляторы и батареи имеют условное буквенно-цифровое обозначение. Первая цифра указывает число последовательно соединенных аккумуляторов. Так как номинальное напряжение свинцового аккумулятора равно 2 В, то номинальное напряжение аккумуляторной батареи равно числу последовательно соединенных элементов, умноженному на два.

Буква после первой цифры обозначает тип или назначение аккумулятора или батарей: С — стационарные, СТ — стартерные, А — авиационные, В — вагонные и т. д. Следующне цифры указывают номннальную емкость. Кроме того, могут быть указаны тип пластин (например, намазные), материал сосуда (Э — эбонит, С — стекло) и сепаратора (М — мипласт, Р — мипор, С — стекловолокно). Для некоторых аккумуляторов указываются климатическое исполнение и размещение. Например, стартерная батарея из трех аккумуляторов емкостью 65 А·ч в моноблоке из эбонита и с сепаратором из мипласта имеет условное обозначение: батарея 3СТ-65ЭМ.

Свинцовые аккумуляторы имеют высокие разрядные напряженння (рис. 38.8) и удельную мощность (до 150 Вт/кг) и относительно недороги. К основным их недостаткам следует отнести низкую удельную энергию и относительно малый ресурс. Совершенствование свинцовых аккумуляторов идет по пути изыскания новых сплавов для решеток (например, свинцово-кальциевых), облегченных и прочных материалов баков (например, на основе сополимера пропилена и этилена), улучшения качества сепараторов. Разработаны герметизированные свинцовые аккумуляторы, которые не требуют доливки воды при эксплуатации, не имеют газовыделения и кислотного тумана.

Стационарные свинцовые аккумуляторные батареи предназначены для эксплуатации на постоянном месте или в условиях, нсключающих перемещение аккумуляторов или машин, в которых они установлены. В большинстве выпускаемых аккумуляторов (тнпов С, СЗ, СК и СКЭ) положительнымн

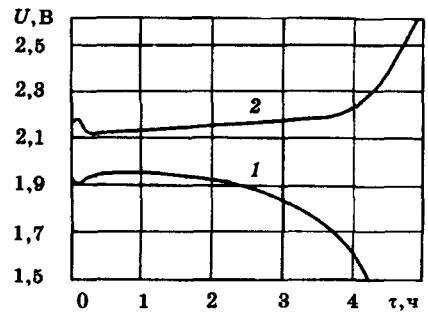


Рис. 38.8. Кривые разряда (*1*) и заряда (*2*) свинцового аккумулятора при 20 °С

электродами служат поверхностные пластины, отрицательными электродами — коробчатые пластины. Баки изготовляются из стекла или эбонита.

Буквенные обозначения аккумуляторов указывают: С — стационарный длительный разряд, К — короткий разряд, З — закрытое исполнение, Э — эбонит, материал бака.

Параметры аккумуляторов приведены в табл. 38.5.

Максимальный ток заряда аккумуляторов с номером $N = 1$ равен 9 А. Емкости и токи разряда и заряда аккумуляторов других номеров N можно найти, перемножив соответствующне значения, приведенные в табл. 38.5, на N аккумулятора. Например, параметры аккумулятора С-10 при 10-часовом разряде равны: емкость $36 \cdot 10 = 360$ А·ч, ток разряда $3{,}6 \cdot 10 = 36$ А, ток заряда $9 \cdot 10 = 90$ А. Саморазряд аккумуляторов не более 23% при хранении в течение 29 сут и не более 16% при хранении в течение 14 сут. Удельная энергия стационарных аккумуляторов этого типа составляет 10÷ 23 Вт·ч/кг. Гарантийный срок хранения 1 год. Гарантийный срок службы прн соблюдении правил ухода 4 года, наработка 800÷1000 циклов.

Стационарные аккумуляторы с поверхностными пластинами содержат относительно большую долю свинца по отношению к актнвной массе. Большинство нз них не имеет крышек, поэтому требуется частая заливка воды в хорошо вентилируемом помещении. Они собнраются, как правило, у потребителя. Указанные недостатки устранены в стационарных аккумуляторах с намазными пластинами типа СН. Эти аккумуляторы собираются на заводах и имеют крышки. Они выделяют значнтельно меньше вредных испарений. Электрические параметры аккумулятора СН-1 приведены в табл. 38.5. Удельная энергия аккумуляторов серии СН равна 11÷ 19 ВТ·ч/кг

Таблица 38.5. Основные электрические параметры стационарных аккумуляторов

Параметр	СК-1	СКЭ-1, СЗ-1, СН-1	С-1, СК-1, СКЭ-1, СЗ-1, СН-1
Режим разряда, ч	0,25	0,5; 1,0	3,0; 10,0
Ток разряда, А	32/40	25/30; 18,5/20,0	9/10; 3,6/4,0
Емкость, А·ч	8/10	12,5/15,0; 18,5/20,0	27/30; 36/40
Наименьшее напряжение в конце разряда, В	1,75		1/80

Примечание. В числителе указаны параметры аккумуляторов серии С, СК, СЗ и СКЭ, в знаменателе — аккумуляторов серии СН.

Таблица 38.6. Авиационные свинцовые аккумуляторные батареи

Тип	Габаритные размеры, мм			Масса батареи с электролитом, кг	Ток разряда, А	
	Длина	Ширина	Высота		при 5-часовом разряде	при стартерном разряде
12-АСАМ-28	369	163	214	31,0	5,0	650÷75
12-САМ-28	369	163	214	28,5	5,6	650÷75
16-САМ-55	323	164	214	29,0	—	—
12-АСА-143	712	733	338	180	25,0	1350÷250

Примечания: 1. АСАМ — авиационная стартерная моноблочная с адсорбированным электролитом; САМ — стартерная авиационная моноблочная; АСА — авиационная стартерная аэродромная.

2. Указанная в обозначении батарей номинальная емкость соответствует 5-часовому разряду.

и 17÷44 кВт·ч/м^3. На базе аккумуляторов СН созданы аккумуляторы СНУ емкостью от 80 до 2240 А·ч, обладающие повышенной механической прочностью. К стационарным также относятся автоблокировочные свинцовые аккумуляторы АБН-72-УХЛ2 и АБН-80-УХЛ2. Аккумуляторы АБН применяются на железных дорогах для питания устройств автоблокировки, сигнализации, телемеханики и связи в стационарных условиях. Буква Н означает намазные пластины. Номинальная емкость указана для режима 25-часового разряда. Емкость при 12-часовом разряде составляет 82÷83%, при 5-часовом разряде — 68÷69% от номинальной. Обозначение УХЛ2 указывает на климатическое исполнение и категорию размещения (2). Аккумуляторы предназначены для работы при температуре окружающей среды от —50 до +55 °С и температуре электролита не ниже —10 °С. Гарантийный срок хранения аккумулятора в сухом виде 1 год с момента изготовления, срок службы 2 года. Саморазряд аккумулятора, отключенного от сети, при температуре воздуха 25±10 °С за 28 сут не должен превышать 28%.

Стартерные батареи. Свинцовые стартерные батареи предназначены для автомобилей, автобусов, тракторов и других машин (сельскохозяйственных, дорожных и т. п.).

Гарантийный срок хранения не залитых раствором электролита батарей установлен 3 года, срок службы 2 года, наработка 2500÷3000 ч. Батареи предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от —35 до +60 °С.

Удельная энергия стартерных аккумуляторов составляет 26÷36 Вт·ч/кг, планируется ее повысить до 40 Вт·ч/кг путем применения полипропиленовых моноблоков и других усовершенствований.

Авиационные батареи. Батареи предназначены для автономного запуска двигателей и бортовых электроагрегатов, для питания электросети при аварийных режимах в системе энергоснабжения самолетов (бортовые), а также для запуска двигателей и для проверки энергооборудования самолетов на аэродроме (аэродромные). В табл. 38.6 приведены данные авиационных батарей.

Гарантийный срок хранения батарей 7 лет, кроме батареи 12-АСА-143, для которой установлен срок хранения 5 лет с момента изготовления. Гарантийный срок эксплуатации батареи 2 года, кроме батареи 12-АСАМ-23, для которой устанавливается срок работы 1 год с момента ввода в эксплуатацию.

ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ И БАТАРЕИ

В щелочных аккумуляторах электролитом служит раствор щелочи, обычно гидроксида калия. Наиболее распространены щелочные никель-кадмиевые и ннкель-железные аккумуляторы. Кроме того, в небольших масштабах выпускаются серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые аккумуляторы.

Щелочные электролиты также используются в разрабатываемых аккумуляторах: никель-цинковых, воздушно-цинковых, воздушно-железных, никель-водородных и кислородно-водородных.

Никель-кадмиевые и никель-железные аккумуляторы и батареи. Суммарные основные уравнения процессов разряда и заряда в аккумуляторах имеют вид:

$$2NiOOH + Cd + 2H_2O \underset{\text{Заряд}}{\overset{\text{Разряд}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2,$$

$$U_{р.ц} = 1{,}30 \div 1{,}35 \text{ В};$$

$$2NiOOH + Fe + 2H_2O \underset{\text{Заряд}}{\overset{\text{Разряд}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2,$$

$$U_{р.ц} = 1{,}35 \div 1{,}40 \text{ В}.$$

Активная масса положительных электродов состоит из гидроксида никеля, активная масса отрицательных электродов — из кадмия илн железа. Электролитом служит раствор гидроксида калия (КОН) плотностью 1190÷1210 кг/м^3 с добавкой 20 кг/м^3 моногидрата гидроксида лития ($LiOH \cdot H_2O$). Большинство никель-кадмиевых и никель-железных аккумуляторов выпускается в ламельном исполнении, активная масса помещается внутри стальных перфорированных коробок (ламелей). Кроме того, некоторые аккумуляторы имеют прессованные и спеченные электроды, в порах которых находится активная масса, и фольговые электроды, у которых к поверхности металлической фольги припечен слой с активным веществом. Аккумуляторы помещаются в стальные никелированные сосуды.

Напряжение аккумулятора зависит от режима разряда (рис. 38.9). Номинальное напряжение равно 1,15 В. Данные аккумуляторов приведены в

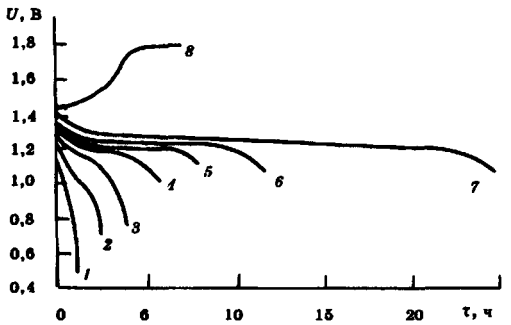


Рис. 38.9. Кривые разряда (*1* — *7*) и заряда (*8*) никель-кадмиевого аккумулятора при 20 °С. Ток заряда численно равен 1/4 номинальной емкости. Режимы разряда

1 — 1-часовой; *2* — 2-часовой (*2*); *3* — 3-часовой; *4* — 4-часовой; *5* — 8-часовой; *6* — 10-часовой; *7* — 25-часовой

табл. 38.7. Номинальная емкость для НК, указанная в обозначенни, соответствует разрядному току, приведенному в таблице.

Соединяя указанные аккумуляторы, можно получить батареи с различными параметрами. Батареи помещаются в деревянные ящики, рамки или металлические каркасы. Батареи в металлических каркасах обозначаются буквой К. Кроме того, в обозначениях батарей буква Т указывает вывод на торцевую сторону, римская цифра — расположение аккумуляторов в рамках: I — в один ряд по длине, II — в два ряда по длине.

Емкость никель-кадмиевых аккумуляторов составляет не менее 0,6 номинальной емкости при —20 °С и не менее 0,2 номинальной емкости при —40 °С.

Срок хранения ламельных ннкель-кадмиевых аккумуляторов 5 лет, никель-железных аккумуляторов 3,5 года, наработка — 1000 циклов.

Применение полиэтиленовых сосудов и другие усовершенствования позволяют улучшить параметры ламельиых аккумуляторов. Новые аккумуляторы имеют обозначения НЖЛ и предназначены для замены соответствующих типов аккумуляторов НК и НЖ: НЖ-22 и НК-28 на НЖЛ-36; НЖ-45 н НК-55 на НЖЛ-60; НЖ-60 и НК-80 на НЖЛ-85.

Одновременные испытания батарен 4НЖЛ-60 и 4НЖ-45 показали преимущество первых. Они имеют более высокне емкость и удельную энергию (30 Вт·ч/кг).

Наибольшее количество щелочных аккумуляторов, выпускаемых промышленностью, составляют тяговые никель-железные ХИТ (ТНЖШ), имеющие емкость 360÷1150 А·ч и предназначенные для электровозов, пассажирских железнодорожных вагонов и внутризаводского транспорта. Тяговые аккумуляторы изготовляются в металлическом корпусе со щелочестойким электроизоляционным покрытием или резиновым чехлом, или в пластмассовых сосудах. В качестве электролита в них используется водный раствор гидроксида натрия (плотность 1190÷1210 кг/м^3 с добавкой 20 г/л гидроксида лития.

На основе аккумуляторов ТНЖШ созданы батарен 66ТНЖШ-300П, 66ТНЖШ-350, 96ТНЖШ-500, 112ТНЖШ-500, 112ТНЖШ-550, 154ТНЖШ-550 и 126ТНЖШ-650*. Выпускаются также батареи из 22, 26, 27, 28, 34, 36 и 40 последовательно соединенных аккумуляторов емкостью 350 А·ч, батареи из 32, 36 и 49 аккумуляторов емкостью 550 А·ч, из 24 и 36 аккумуляторов емкостью 600 А·ч и из 36 аккумуляторов емкостью 1150 А·ч.

Номинальное напряжение батареи равно произведению номинального напряжения аккумулятора на число аккумуляторов и коэффициент 0,98, учитывающнй потери напряжения в перемычках. Параметры тяговых аккумуляторов удалось улучшить путем применения отрицательных безламельных электродов и с помощью других усовершенствований. Такие аккумуляторы предназначены для безрельсового транспорта. Удельная энергия аккумуляторов серии ТНЖК (31÷36 Вт·ч/кг и 58÷67 кВт·ч/м^3) заметно выше, чем у аккумуляторов серии ТНЖ (21÷26 Вт·ч/кг и 44÷48 кВт·ч/м^3).

* Первое число обозначает число последовательно соединенных аккумуляторов, последнее — емкость, А·ч.

Таблица 38.7. **Характеристики никель-кадмиевых (НК) и никель-железных (НЖ) аккумуляторов**

Тип аккумулятора	Габаритные размеры, мм			Масса, кг		Нормальный зарядный ток при 6-часовом заряде, А	Нормальный разрядный ток, А, до конечного напряжения 1 В
	Длина	Ширина	Высота	без электролита	с электролитом		
НК-13	103	34	126	0,60	0,75	3,3	1,3
НК-28	127	34	216	1,35	1,69	7,0	2,8
НК-55	127	55	216	2,2	2,78	14,0	5,5
НК-80	154	47	352	3,5	4,46	20,0	8,0
НК-125	154	72	352	5,10	6,60	31,0	12,50
НЖ-42	127	34	216	1,35	1,69	5,5	2,75
НЖ-45	127	55	216	2,20	2,78	11,2	5,65
НЖ-60	154	47	352	3,50	4,46	15,0	7,50
НЖ-100	154	72	352	5,10	6,60	25,0	12,50

Аккумуляторы предназначены для работы при температуре электролита от —20 до +45 °С. В аккумуляторах, предназначенных для работы при —20 °С, должен использоваться в качестве электролита водный раствор гидроксида калия плотностью 1260÷1280 кг/м^3 без добавки гидроксида лития. Срок хранения аккумуляторов 3,5 года, ресурс 7000 ч, наработка 1000 циклов.

На основе аккумуляторов ТНЖК собираются батареи 34ТНЖК-300, 36ТНЖК-300, 20ТНЖК-400, 22ТНЖК-400, 34ТНЖК-400, 40ТНЖК-400, 36ТНЖК-500, 40ТНЖК-500, 34ТНЖК-600, 36ТНЖК-600, 36ТНЖК-700, 36ТНЖК-1000.

Особую группу никель-кадмиевых аккумуляторов составляют герметичные аккумуляторы, в которых положительные электроды имеют меньшую емкость, чем отрицательные электроды. Выделяющийся в конце заряда кислород окисляет кадмий, поэтому давление в аккумуляторе не повышается. Скорость образования кислорода должна быть невелика, поэтому аккумулятор заряжают относительно небольшим током. Герметичные аккумуляторы подразделяются на дисковые (обозначение Д), цилиндрические (обозначение Ц) и прямоугольные (обозначение НКГ).

В табл. 38.8 приведены данные дисковых и цилиндрических аккумуляторов и батарей.

Герметичные аккумуляторы применяются для слуховых аппаратов, малогабаритных радиоприемников, магнитофонов, киноаппаратуры, карманных фонарей и т. д.

Гарантийный срок хранения аккумуляторов Д-0,1 — 15 мес, Д-0,25 — 6 мес, батареи 7Д-0,115 — 14 мес. Гарантийный срок эксплуатации аккумуляторов Д-0,25 — 12 мес, а Д-0,1 — 14 мес , батареи 7Д-0,115 — 15 мес.

Наработка дисковых аккумуляторов до 400 циклов, цилиндрических аккумуляторов — от 100 до 300 циклов в зависимости от условий испытаний. Герметичные прямоугольные никель-кадмиевые аккумуляторы производятся с отрицательными и неметаллическими электродами из оксида кадмия (тип НКГК) или с металлокерамическими кадмиевыми электродами (тип НКГ). Номинальная емкость выпускаемых аккумуляторов лежит в пределах 3,5÷50,0 А·ч, удельная энергия 16÷23 Вт·ч/кг и 45÷63 кВт·ч/м^3.

Никель-водородные и никель-металлогидридные аккумуляторы. Разработан аккумулятор, в котором анодом служит водородный электрод. Токообразующая реакция в аккумуляторе

$$2NiOOH + H_2 \underset{\text{Заряд}}{\overset{\text{Разряд}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2, \quad E_э = 1{,}36 \text{ В}.$$

Водород либо хранится непосредственно в сосуде аккумулятора, либо обратимо поглощается интерметаллидами, например соединениями FeTi, $NiTi_2$. По сравнению с никель-кадмиевым аккумулятором никель-водородный аккумулятор имеет высокую удельную энергию. Например, аккумулятор НВ-40 имеет емкость 40 А·ч, удельную энергию 45 Вт·ч/кг и 80 кВт·ч/м^3. Максимальное давление водорода 40 МПа.

К недостаткам никель-водородного аккумулятора следует отнести саморазряд из-за взаимодействия водорода с активной массой положительного электрода. Поэтому в заряженном состоянии он хранится лишь кратковременно (потеря емкости за сутки составляет 6÷10%). В последние годы созданы никель-металлогидридные аккумуляторы, в которых анодами служат интерметаллиды, напрнмер $LaNi_5$,

Таблица 38.8. Данные герметичных никель-кадмневых аккумуляторов и батарей

Тип аккумуляторов и батарей	Габаритные размеры, мм		Масса, г	Зарядный ток, мА	Разрядный ток, мА
	Диаметр	Высота			
Д-0,1	20,0	6,9	7	12	23
Д-0,25	27,0	10	14	25	50
7Д-0,115-У1.1	24,0	62	60	12	20
ЦНК-0,2	16,0	24,5	15	20	20
ЦНК-0,45	14,0	50	21	45	45
ЦНК-0,85	14,0	96	41	85	85
ЦНК-0,9-У2	14,0	96	49	90	90
3ЦНК-0,2	16,0	74	40	20	40
5ЦНК-0,2	87×24	27	117	20	100
11ЦНК-0,45	112×39	57	350	45	90

Примечания: 1. Номинальная емкость и номинальное напряженне при 20 °С соответствуют 5-часовому режиму разряда, за исключением батареи 7Д-0,115-У1 1, у которой номинальная емкость и напряжение приведены для 10-часового режнма разряда (разрядный ток 11,5 мА). При —18 °С емкость составляет 30% номинальной.

2. Номинальное напряженне аккумуляторной батареи равно чнслу аккумуляторов, умноженному на 1,2 В. Напряжение в конце разряда 1 В.

3. Время заряда аккумуляторов и батарей 15 ч.

VNi_2, обратимо сорбирующие водород. Токообразующая реакция в этом аккумуляторе выражается уравнением

$$n\,NiOOH + MH_n \underset{Заряд}{\overset{Разряд}{\rightleftarrows}} n\,Ni(OH)_2 + M;$$

$$E_э = 1{,}33\ В.$$

Эти аккумуляторы имеют такое же напряжение, как и никель-кадмиевые, но более высокую емкость и удельную энергию (в 1,3÷1,5 рвза). Кроме того, они не содержат токсичный кадмий. Поэтому эти аккумуляторы получают все большее распространение.

Серебряно-цинковые аккумуляторы. Активными веществами в вккумуляторах служат оксид серебра и цинк, электролитом — рвствор КОН.

Аккумуляторы имеют высокие удельные энергию (до 130 В·ч/кг) и мощность (до 500 Вт/кг). Разрядная кривая аккумуляторов имеет две площадки, одна из них при напряжении 1,8, вторая — 1,54 В. Недостатками серебряно-цинковых аккумуляторов является их высокая цена, дефицитность серебра и малая наработка (10÷100 циклов).

Никель-цинковые аккумуляторы. Активными веществами в аккумуляторах служат гидроксид никеля и цинк, электролитом — раствор гидроксида калия. Суммарная реакция в аккумуляторе

$$2NiOOH + Zn + H_2O \underset{Заряд}{\overset{Разряд}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + ZnO.$$

Напряжение при разряде 1,7÷1,8 В, удельная энергия 50÷70 Вт·ч/кг.

Испытаны аккумуляторы различной емкости. Например, аккумулятор НЦ-125 имеет емкость 125 А·ч при 2-часовом разряде и номинальное напряжение 1,65 В. Габаритные размеры 239×123××82 мм, масса с электролитом 4,3 кг. Удельная энергия 50 Вт·ч/кг и 100 кВт·ч/м^3. Аккумулятор НЦ-240 имеет емкость 240÷280 А·ч, массу 9 кг. Наработка аккумуляторов 150÷250 циклов.

ВОЗДУШНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ АККУМУЛЯТОРЫ

При использовании кислорода воздуха можно значительно повысить удельную энергию аккумулятора. Ведется разработка воздушно-цинковых и воздушно-железных аккумуляторов.

Определенные успехи достигнуты в создании воздушно-железных аккумуляторов. Удельная энергия испытанных в лаборатории батарей составляла 50÷60 Вт·ч/кг. Однако удельная мощность (10÷12 Вт/кг) и напряжение (0,65 В) невелики.

В последние годы созданы образцы воздушно-цинковых аккумуляторов с удельной энергией до 100 Вт·ч/кг и ресурсом до 400 циклов.

ЛИТИЕВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Широкомасштабные исследования последних лет увенчались успехом в разработке аккумуляторов с неводнымн растворами электролита, литневыми анодами и катодами на основе TiS_2, MoS_2, $LiAl_2O_4$ н др. Выпускаются малыми сериями малогабаритные аккумуляторы, имеющие удельную энергию 50÷60 Вт·ч/кг, но небольшой ресурс — до 100 циклов. Более высокнй ресурс и удельную энергию имеют литий-ионные аккумуляторы, в которых литий иитеркалируется как на аноде (углеродные материалы), так н на катоде (оксиды). Например, по уравнению

$$(CLi_x)_n + (iCoO_2)_n \underset{Заряд}{\overset{Разряд}{\rightleftarrows}} C_n + n\,Li_xCoO_2.$$

Как видно, в реакции не участвует металлический литий. Поэтому литий-ионный аккумулятор взрывобезопасен и имеет высокие ресурс (до 1000 циклов) и удельную энергию (до 120 Вт·ч/кг).

Разрабатываются также литиевые аккумуляторы с полимерными электролитами.

АККУМУЛЯТОРЫ С ТВЕРДЫМИ ЭЛЕКТРОЛИТАМИ

Для разработки электромобиля с дальностью пробега без перезарядки свыше 100 км требуются аккумуляторы с удельной энергией 100 Вт·ч/кг и выше. К перспективному направлению решения этой проблемы относится создание аккумуляторов с твердыми и расплавленными электролитами. Наибольший интерес вызывает серно-натриевый аккумулятор, в котором электролнтом служит полиалюмннат натрия $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$, имеющий ионную (по Na^+) электропроводность. Удельная проводимость алюмината натрия составляет 3,0÷3,5 См/м прн 25 °С и 23÷30 См/м при 300 °С. Активными веществами этого аккумулятора являются сера на положительном электроде и натрий на отрицательном электроде. Реагенты при 300 °С находятся в жидком, электролит — в твердом состоянии.

Напряжение разомкнутой цепи 2,1 В. Созданы и испытаны аккумуляторы и батареи с удельной энергией 100 Вт·ч/кг и выше. Практическое применение этих аккумуляторов пока тормозится высокой стоимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

38.1. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетнка. М.: Энергоатомиздат, 1991.

38.2. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981.

38.3. Коровнн Н.В. Новые химические источники тока. М.: Энергия, 1978.

38.4. Варыпаев В.Н., Дасоян М.А., Никольский В.А. Химическне источники тока. М.: Высшая школа, 1990.

38.5. Кедринский И.А., Дмитренко В.Е., Грудянов И.И. Литневые источникн тока. М.: Энергоатомнздат, 1992.

38.6. Коровин Н.В. Электрохимические генераторы. М.: Энергия, 1974.

38.7. Кромптон Т. Вторичные источники тока. М.: Мнр, 1985.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Раздел 20

Кабели
- аэродромные 39
- гибкие для дуговой сварки 39
- гибкие общего применения 37
- для радиоустановок 39
- контрольные 5, 31, 33
- лифтовые 39
- оптические 46
- радиочастотные 6
- рентгеновские высоковольтные 39
- связи 5
- силовые 5, 10, 12, 15, 17, 22
- управления 5, 31, 34

Кабели и провода
- для горных разработок и землеройных работ 39
- для подвижного состава 39
- монтажные 40
- различные с пластмассовой и резиновой изоляцией 33

Провода
- контактные 9
- неизолированные 5, 7
- обмоточные 8
- с волокнистой, эмалево-волокнистой, бумажной и пленочной изоляцией 44
- со стекловолокнистой изоляцией 45
- с эмалевой изоляцией 42
- силовые 6, 33, 35
- установочные 6, 33, 35

Проволока
- алюминиевая и из алюминиевых сплавов 6
- медная 6

Профили для коллекторов электрических машин 10
Шины 9
Шнуры соединительные 33, 38

Раздел 21

Вводы на 110 кВ и выше 68—71
Изоляторы линейные 62—68
- — для электрифицированных железных дорог 68
- — стеклопластиковые 68
- — тарельчатые 63—68
- — штыревые 62—63
- — опорные 56—58, 60
- — проходные 58, 59, 61, 62

Испытательные напряжения 50
Классификация изоляторов 55—56
Изоляция внешняя и внутренняя 48—49
- бумажно-масляная 55

Расчет внутренней изоляции ввода 72, 74
- изоляторов 71, 72
- электрической прочности типовых электроизоляционных промежутков 52—55

Требования к электроизоляционным конструкциям 48—51

Раздел 22

Демультиплексор 84
Детектор фазовый 79
Дешифратор 84
Интегратор 78
Коммутатор аналоговый 79
Компаратор аналоговый 78
- цифровой 85

Коэффициент усиления 77
Микроконтроллер 94
Мультиплексор 84
Перемножитель аналоговый 79
Преобразователь аналого-цифровой 92
- цифроаналоговой 92
- кода 87

Регистр 89
Сопротивление входное 77
Стабилизатор напряжения 80
Сумматор аналоговый 77
- цифровой 85

Схема интегральная заказная 97
Счетчик 88
Триггер 87
Усилители операционные 77
Устройства арифметическо-логические 87
- запоминающие оперативные 90
- постоянные 91

Шифратор 84
Элементы логические 80
- логические комбинационные 84

Раздел 23

Блоки резисторов 98—101
Конденсаторные установки 107, 109, 114, 115
Конденсаторы для емкостной связи 106, 110, 112
- импульсные 106, 113, 114
- косинусные 106—108
- повышенной частоты 106, 109
- фильтровые 106, 112, 113

Реакторы бетонные одиночные 117, 119
- сдвоенные 117, 118—120
- дугогасящие 123
- зарядные 122
- заземляющие 116, 122
- коммутирующие 116
- сглаживающие 116, 121
- помехоподавляющие 116
- токоограничивающие 116, 117

– шунтирующие 116, 121
Резистивные элементы 98, 99
Резисторы добавочные 98, 100
– нагрузочные 98
– пусковые 98, 100
– пускорегулирующие 98, 100
– регулировочные 98
– специальные 98
– тормозные 98, 100
– установочные 98
Реостаты возбуждения 103, 104
– пусковые и пускорегулирующие 102, 103, 105, 106

Раздел 24

Автотрансформаторы:
– обозначения 125, 137
– определение 125
– расчетная мощность 132
– силовые 125
– схемы включения 131
Трансформаторы:
– активная часть 126
– броневые, бронестержневые 126, 127
– группы соединения обмоток 128—130
– классификация 125
– магнитопроводы 126
– нагрузочная способность 137
– несимметричная нагрузка 129, 131
– номинальные данные 125, 139—155
– обмотки 126, 127
– обозначения типов 137, 152
– охлаждение 134, 136—137
– параллельная работа 129
– регулирование напряжения 133—136
– системы охлаждения 134–137
– стабилизация напряжения 133—134
– стандарты 156, 157
– стержни магнитопроводов 126, 127
– сухие 126, 151—156
– технические данные 137—156
– с расщепленными обмотками 126, 127
– чередующиеся обмотки 127, 131
– ярма магнитопроводов 126—129

Разделы 25, 27 и 28

Аксиальная вентиляция 167
Активное сопротивление обмоток 200, 228
Балансирные машины 234
Брызгозащищенная машина 166
Векторная диаграмма синхронной машины 203, 205, 206
Вентиляция электрических машин 167, 195, 197
Взрывозащищенная электрическая машина 166
Внешние характеристики генераторов постоянного тока 231
– – синхронных машин 207
Водородное охлаждение 197, 216
Возбудитель 198
Волновые обмотки 192
Вращающееся магнитное поле 188
Вращающие моменты машин постоянного тока 230, 231
– – синхронных машин 188
– – электрических машин 161
Генераторы синхронные 187, 190, 191, 203
Гидрогенераторы 189, 191, 195, 211
Двигатели постоянного тока 225, 233, 234
Демпферные обмотки 194
Данные серии электрических машин 233
Защищенная электрическая машина 166
Изоляция обмоток электрических машин 193, 195
Индуктивное сопротивление главное 200
– – рассеяния 200
Индуктор 187
Искажение синусоидальности 170
Исполнения электрических машин 163, 165
Капезащищенные электрические машины 166
Катушечные обмотки 192
Классы нагревостойкости 170
Коллекторы 227
Компенсаторы синхронные 189, 209, 216
Короткие замыкания синхронной машины 207
Коэффициент обмоточный 202
– воздушного зазора 200
– формы поля 200, 202
Коэффициенты искажения несинусоидальности 170, 201
Крановые и металлургические двигатели 235
Кратковременный режим 168
Кратность напряжения возбудителя 198
Линейная нагрузка 230
Магнитная индукция 230
Магнитная цепь машины постоянного тока 229
– синхронной машины 201
Мощности синхронной машины 206
Независимое возбуждение 198, 231
Неявнополюсный ротор 195
Неявнополюсные машины 195, 203
Номинальные режимы электрических машин 168
Нормальные характеристики холостого хода синхронных машин 202
Обдуваемые электрические машины 167
Обмотки машин синхронных 194, 195
– – постоянного тока 226
Обмоточные коэффициенты 202
Открытая электрическая машина 166
Охлаждение синхронных машин 195, 197
Охлаждение электрических машин 167
Параллельная работа синхронных машин 203
Параллельное возбуждение 232
Перегрузка электрической машины 170
Повторно-кратковременный режим 169
Последовательное возбуждение 233
Потери машины постоянного тока 231

Превышение температуры электрических машин 170
Проводимости магнитные воздушного зазора 200
Продолжительность включения (ПВ) 169
Продолжительный режим 168
Пусковые обмотки синхронных двигателей 194
Радиальная вентиляция 167
Рассеяние в электрических машинах 200
Регулировочная характеристика синхронной машины 207
Синхронные двигатели 187, 189, 206, 216
– машины 187, 188, 191
Системы возбуждения синхронных машин 198
Скорость нарастания напряжения возбуждения 198
Смешанное возбуждение 233
Сопротивления обмоток машин постоянного тока 228
Стандарты на электрические машины 165, 168
Требования к электрическим машинам 168
Тропического исполнения электрическая машина 166
Турбогенераторы 195, 211
Уравнения машины постоянного тока 230
– синхронных машин 203, 205
Характеристики генераторов постоянного тока 231
Характеристики двигателей постоянного тока 233
Характеристический треугольник машин постоянного тока 231
Электрические машины 158
Электродвижущая сила машины постоянного тока 228
Явнополюсные синхронные машины 192

Раздел 26

Векторная диаграмма 172
Двигатели однофазные 174
– – конденсаторные 174
– – с короткозамкнутым витком на полюсе 175
– – трехфазные 171
– – с короткозамкнутым ротором 175
– – с фазным ротором 175
Круговая диаграмма 172
Момент обратной последовательности 174
– прямой последовательности 174
– пусковой 172
– результирующий 174
– электромагнитный 172
Поле обратной последовательности 174
– прямой последовательности 174
– пульсирующее 174
– ротора 171
– статора 171
Режим работы асинхронный 171
– – генераторный 171
– – двигательный 171
– тормозной 171
– трансформаторный 171
– установившийся 171
Скольжение 171
Схемы замещения 172
Серия асинхронных двигателей АИР 181
– – – АСИ 181
– – – АТД4 181
– – – РА 183
– – – 4А 175–181

Раздел 29

Бесконтактные моментные электродвигатели 253
Вентильные генераторы 261
– – автомобильные 264
– – мотоциклетные 264
– – тракторные 264
Вентильные двигатели 240
– – серии ВД 244
– – серии ПЧВС 246
– – серий ДБН и ДБМР 253
– – серии ДВУ 248
– – серии 2ДВУ 250
– – серии 2ДВН 251
– – электромеханических модулей 259
Датчики положения ротора 242
Электромеханический привод 255
– – с релейным законом управления 255
– – тиристорный 260
– – транспортных роботов 258
Характеристики вентильных двигателей 242

Раздел 30

Исполнительные двигатели 268
– – асинхронные 268
– – постоянного тока 269
– – шаговые 271
Микродвигатели асинхронные 280
– коллекторные 288
– синхронные 283
Сельсины 275
Тахогенераторы 273
Трансформаторы вращающиеся 277

Разделы 31–36

Аппараты электрические 291
– – автоматики 296, 377
– – высокого напряжения 293, 301
– – гибридные 375
– – защиты 388
– – низкого напряжения 295
– – распределительных устройств 339
– – статические 292
– – управления 339
– электромеханические 292

Выключатели высоковольтные баковые масляные 304
– – вакуумные 307
– – воздушные 306
– – маломасляные 304
– – элегазовые 293, 306
– – электромагнитные 306
Герконы (см. магнитоуправляемые контакты) 381
– асимметричные 381
– жидкометаллические 381, 383
– замыкающие 381
– переключающие 381, 385
– размыкающие 381
– симметричные 381
– сухие 381, 383
– язычковые 381
– якорные 381
Датчики 393
– активные 399
– пассивные 394
Контакторы 351
– переменного тока 354
– постоянного тока 354
Магнитные системы промышленных устройств 408
Магнитоуправляемые контакты (см. герконы) 381
Предохранители 312
– выхлопные 312
– кварцевые 311
– плавкие 363
Пускатели 351
– переменного тока 355
Разрядники вентильные 315
– ограничители перенапряжения 314
– трубчатые 313
Разъединители внутренней установки 309
– наружной установки 310
– подвесного типа 310
Реле 377
– комбинированные 388
– мощности 377
– напряжения 377
– промежуточные 378
– с выдержкой времени 378
– сигнальные 378
– статические 390
– электронные 388
Трансформаторы тока внутренней установки 323
– наружной установки 325
Трансформаторы напряжения — делители напряжения 335, 337
– каскадные 335, 336
– литые 335, 336
– масляные 335, 336
Электромагниты 339, 401
– для намагничивания и исследования магнитных материалов 412
– переменного тока 342
– постоянного тока 340
– управления 339
– эталонные 415
Электроуправляемые муфты 349
– – ферропорошковые 349
– – фрикционные 349

Раздел 37

Выпрямитель двухполупериодный 444
– мостовой 444
– несимметричный 453
– нулевой 444
– одиополупериодный 444
– полууправляемый 454
– с нулевым вентилем 453
– с уравнительным реактором 449
– однофазный 444
– трехфазный 444
Диод силовой 420
Драйвер управления 426, 437
Инвертор автономный 465
– напряжения 469
– резонансный 477
– с отсекающими диодами 468
– тока 465
– ведомый сетью 451
Источник вторичного электропитания 480
Ключ силовой полупроводниковый 419
Коммутация параллельная 463
– последовательная 464
– принудительная 463
Компенсатор неактивной мощности 474
Коэффициент мощности 452, 455
Модуль диодно-тиристорный 441
– МДП силовой 431
– силовой интеллектуальный 420, 438
Модуляция широтно-импульсная 471
Мощность активная 462
– искажения 462
– реактивная 462
Преобразователь переменного напряжения 462
– автогенераторный 491
– двухтактный 490, 494
– импульсный 470
– однотактный 485
– реверсивный 455
– с непосредственной связью 458
Пульсации напряжения 446, 482
Разделение гальваническое 484
– конденсаторное 484
Регулирование широтное 470
– широтно-импульсное 471
Регулятор напряжения импульсный 480
Система управления асинхронная 460
– – многоканальная 460
– – одноканальная 460
– – синхронная 460

Слежение нмпульсное 472
– интегральное 473
Стабнлизатор напряжения 495
Тнрнстор 439
– двухоперацнонный 440
– полевой 437
Ток уравнительный 457
Транзнстор бнполярный с нзолированным затвором 432
– силовой 420
– МДП силовой 430
– статический индукционный 421
Управление раздельное 457
Фнльтр основной гармоники 474
– режекторный 476
– резонансный 476
– сглаживающий 446
Характеристика внешняя 443, 449, 467, 482
– входного тока 452
– регулировочная 450, 457, 481
Эффект накопления 465

Раздел 38

Аккумуляторные батареи авиационные 509
– – стартерные 509
– – стациоиариые 508
– – тяговые 510
Аккумуляторы воздушно-металлические 512
– дисковые 511
– герметичиые 511
– кнслотные (свиицовые) 507
– ламельные 509
– литиевые 512
– никель-водородные 511
– никель-железные 509
– иикель-кадмиевые 509
– никель-металлогидридные 511
– никель-цииковые 512
– серебряио-цииковые 512
– серно-натриевые 512
– тяговые 510
– цилиндрнческие 511
– щелочные 509
Батарея гальваническая 498
– коруид 503
– топливных элементов 506
– тепловые 505
Емкость номинальная 500
– разрядная 500
Крнвая вольт-амперная 499
– зарядная 499
– разрядная 499
Мощность удельная 500
Напряжение зарядное 499
– разрядное 499
Наработка 500
Поляризация коицентрационная 499
– химическая 499
– электрохимическая 499
Потенциал равиовесный 499
– статический 499
– стациоариый 499
Ресурс 500
Саморазряд 500
Сопротивление омическое 499
– поляризационное 499
Сохраняемость заряда 500
Химические источники тока (ХИТ)
– – – водоактивируемые 503
– – – вторичные 507
– – – первичные 500
– – – резервные 503
– – – с твердым электролитом 512
– – – тепловые 505
Электродвижущая сила (ЭДС) 499
Электроды коробчатые 507
– намазиые 507
– панцнрные 507
– пастированные 507
– поверхностные 507
– прессованные 509
– спеченые 509
Электрохимическая система 498
– эиергоустановка 506
Электрохимический геиератор 506
Элемеиты гальваиические 498
– системы кислород—воздух—циик 503
– системы MnO_2–Zn с солевым электролитом 501
– системы MnO_2—Zn с щелочным электролитом 501
– с твердым электролитом 506
– сухие 501
– топливные 506

Справочное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. 2
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ И УСТРОЙСТВА

Редактор М. П. Соколова
Художественные редакторы А. Ю. Землеруб, Е. Н. Комарова
Технический редактор З. Н. Ратникова
Корректоры Р. М. Ваничкина, В. В. Сомова

Оригинал-макет подготовлен Издательством МЭИ

ЛР № 020528 от 05.06.97 г.

Подписано в печать с оригинала-макета 16.11.98 Формат 70x108 1/16
Бумага офсетная №1 Гарнитура «Таймс» Печать офсетная
Усл. печ. л. 45,1 Усл. кр.-отт. 45,1 Уч.-изд. л. 61,2
Тираж 1000 экз. Заказ № 367 С-014
Издательство МЭИ (ТУ), 111250, Москва, Красноказармеиная ул., д. 14
Отпечатано в ОАО «Типография «Новости», 105005, Москва, ул. Ф. Энгельса, д. 46

Готовится к печати в Издательстве МЭИ

Справочная серия
«Теплотехника и теплоэнергетика»
в 4-х книгах (3-е издание)

Книги справочной серии содержат конкретные сведения и рекомендации, необходимые при решении разнообразных теплоэнергетических и теплотехнических задач, включая сведения по фундаментальным и базовым дисциплинам. Справочники предназначаются, в первую очередь, для инженерно-технических и научных работников электрических станций, промышленных предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов и преподавателей соответствующих специальностей вузов.

Справочная серия состоит из 4-х книг. Единый подход к отбору, обработке и представлению материалов, взаимные ссылки между справочниками объединяют их в единое целое. Для 3-го издания все материалы критически пересматриваются в свете опыта использования предыдущих изданий, дополняются с учетом прогресса науки и техники в соответствующих областях, требований новых нормативных документов.