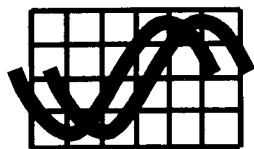


ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

В ЧЕТЫРЕХ ТОМАХ



ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ

*профессоров Московского энергетического института (технического университета)
В.Г.Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф.Ильинского, В.А.Лабунцова,
В.П.Морозкина, И.Н.Орлова (главный редактор),
А.И.Попова, В.А.Строева*

8-е ИЗДАНИЕ, ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

1

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ.
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**



МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО МЭИ 1995

ББК 31.2
Э45
УДК 621.3(035.5)

Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1.

Э45 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. — 8-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 1995. — 440 с.: ил.

ISBN 5-7046-0099-9

ISBN 5-7046-0100-6 (Т. 1)

Приведены сведения по теоретическим основам электротехники, электрофизике, измерениям электрических и магнитных величин, применению вычислительной техники и моделированию в электротехнике и энергетике, по автоматизации проектных работ, стандартизации и надежности электротехнического оборудования. Даны основные правила оформления электротехнической документации и сведения по промышленным радиопомехам, электротехническим материалам, неразрушающему контролю и диагностике электротехнических изделий. Предыдущее, седьмое, издание справочника выпущено в 1985 г.

Рассчитан на широкий круг инженеров-электриков.

Э $\frac{2202000000-005}{097(02)-95}$ без объявл.

ББК 31.2

ISBN 5-7046-0099-9

ISBN 5-7046-0100-6 (Т. 1)

© Авторы, 1995

© Авторы т.1, 1995

ПРЕДИСЛОВИЕ К ВОСЬМОМУ ИЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО СПРАВОЧНИКА

С 1952 г. преподавателями Московского энергетического института по инициативе и под руководством его ректора профессора М.Г. Чиликина (бывшего главным редактором пяти первых изданий) в стране начал выпускаться фундаментальный «Электротехнический справочник». Отзывы читателей на семь предыдущих изданий справочника показали, что он стал полезным учебным пособием для студентов многих электротехнических, электромеханических и электроэнергетических специальностей и, кроме того, настольной справочной книгой широкого круга инженеров.

Предыдущее — исправленное и дополненное — издание «Электротехнического справочника» вышло в 1985—1988 гг. в трех томах (четыре книги) и, несмотря на тираж 90 тыс. экземпляров, быстро разошлось. Это и побудило начать подготовку нового, уже восьмого, издания справочника. За прошедшие годы ушли из жизни члены редколлегии справочника профессора МЭИ П.Г. Грудинский, М.М. Соколов, А.М. Федосеев, А.Я. Шихин и бессменный редактор И.В. Антик, внесшие огромный вклад в его совершенствование. Редколлегия в значительно обновленном составе берет на себя смелость продолжить их труд, опираясь на сложившиеся традиции, опыт и потенциал педагогов и ученых МЭИ.

Первый том настоящего, восьмого, издания справочника, подготовленный редколлекцией, предполагалось издать в Энергоатомиздате в 1991 г. Однако из-за трудностей с выпуском научно-технической литературы справочник тогда не увидел света. Лишь благодаря поддержке руководства РАО «Единая энергетическая система (ЕЭС) России», МЭИ и Издательства МЭИ, материальной помощи РАО ЕЭС России, которым редколлегия выражает искреннюю признательность, первый том выходит в издательстве МЭИ.

Как и для предыдущих изданий, для настоящего справочника характерны энциклопедичность, охват весьма широкого круга вопросов, относящихся к электротехнике и электроэнергетике.

Сохраняется и его направленность — он должен служить как студентам, решающим учебные проектные задачи разного уровня, так и инженерам, работающим в самых разнообразных сферах производства, передачи, распределения и использования электрической энергии.

Большая часть материалов настоящего издания заметно переработана, обновлена и дополнена. Авторы и редакторы стремились не только дать справочные сведения на сегодняшнем уровне, но и отразить современные концепции и тенденции развития электротехнических изделий, устройств, систем и комплексов, ориентировать читателя на использование новых средств и методов решения технических задач. Сделан необходимый акцент на более конкретную и удобную для практического использования (в том числе на этапе начального анализа и выбора технического решения) форму подачи, методике, стиль и систематичность изложения материала, а также исключено дублирование, устранены устаревшие и второстепенные сведения.

В справочник дополнительно введены новые разделы: «Автоматизация проектных работ», «Микропроцессоры и их применение», «Эргатические системы». Переработан материал раздела «Инженерный эксперимент в электротехнике», а также разделов, посвященных электрическим машинам, аппаратам, электроприводу и др.

В новом издании справочника учтены изменения в стандартах, руководящих указаниях, уточнены данные различных каталогов. По многим разделам приводятся расчетные примеры. Авторский коллектив стремился к тому, чтобы методы расчета,

рекомендации и показатели, приводимые в справочнике, помогали разработчикам обеспечивать требования по конкурентоспособности, энергосбережению, экологии, надежности и другим показателям качества проектируемых объектов. Хотя справочник в основном предназначен в качестве пособия для решения задач проектирования, в нем по возможности учитываются также требования эксплуатации.

Справочник выпускается в четырех томах.

В первом томе отражены общие вопросы и приводятся данные об электротехнических материалах. Помещены основные сведения по электрофизике, теоретической электротехнике, измерению электрических и магнитных величин, моделированию, организации инженерного эксперимента и использованию микропроцессорных устройств в электротехнике. Рассмотрены вопросы инженерного проектирования, автоматизации проектных работ, надежности, обеспечения безопасности объектов и их использования в человеко-машинных (эргатических) системах. Приведены сведения по электроизоляционному, полупроводниковому, магнитному, проводниковому и сверхпроводниковому материалам, контролю качества материалов и изделий.

В следующих томах будут рассмотрены следующие темы.

Во втором томе — электротехнические устройства и оборудование: кабельные изделия, изоляторы, полупроводниковые приборы, резисторы, конденсаторы, реакторы, трансформаторы, различные типы электрических машин и электрических аппаратов, полупроводниковые преобразователи и источники вторичного электропитания, химические источники тока.

В третьем томе — устройства и системы производства, передачи и распределения электрической энергии: электроэнергетические системы, электрические станции и подстанции, распределительные устройства, электрические сети, защита, автоматика, управление и контроль в электроэнергетических системах, электроснабжение городов, сельского хозяйства, промышленных предприятий и транспорта.

В четвертом томе — материалы по использованию электрической энергии в промышленности, на транспорте и в быту: по автоматизированному электроприводу, электрическому транспорту, оборудованию для электротермии, электросварки и электротехнологии, электрическому освещению, электробытовым приборам и электроинструменту.

Авторами справочника, как и ранее, являются преимущественно профессора и преподаватели МЭИ. Перечень авторов, участвующих в работе над справочником, приводится в начале каждого тома.

Авторы и редколлегия справочника будут признательны всем его читателям, которые сочтут возможным сообщить о замеченных недостатках и о пожеланиях по улучшению или дополнению его материала по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Издательство МЭИ.

Редакционная коллегия

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к восьмому изданию Электротехнического справочника	3	Раздел 10. Общие вопросы стандартизации и надежности электротехнического оборудования	195
Раздел 1. Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные	7	Раздел 11. Эргатические системы	217
Раздел 2. Основные сведения по электрофизике	19	Раздел 12. Основные правила оформления конструкторской документации	234
Раздел 3. Методы расчета электрических цепей	37	Раздел 13. Промышленные шумы и промышленные радиопомехи	276
Раздел 4. Расчет электрических и магнитных полей	74	Раздел 14. Диэлектрические материалы ..	304
Раздел 5. Измерения электрических и магнитных величин	91	Раздел 15. Полупроводниковые материалы ..	326
Раздел 6. Моделирование в электротехнике и электроэнергетике	127	Раздел 16. Проводниковые материалы ..	346
Раздел 7. Инженерный эксперимент в электротехнике	142	Раздел 17. Магнитные материалы	365
Раздел 8. Автоматизация проектных работ ..	165	Раздел 18. Контроль качества и диагностика электротехнических материалов и изделий ..	393
Раздел 9. Микропроцессоры и их применение ..	170	Раздел 19. Безопасность электрооборудования и электроустановок	417
		Предметный указатель	435

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Материалы первого тома подготовили:

Раздел 1. Единицы физических величин. Важнейшие физические постоянные — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жуховицкий.	Раздел 8. Автоматизация проектных работ — доктор техн. наук, проф. С. И. Маслов, доктор техн. наук, проф. В. Г. Миронов.	технике — канд. техн. наук, доц. Е. А. Бородин, доктор техн. наук, проф. А. П. Вошинин, канд. техн. наук, доц. В. Б. Кравченко, доктор техн. наук, проф. А. И. Пирогов, канд. техн. наук, доц. Ю. Н. Сергиевский.
Раздел 2. Основные сведения по электрофизике — доктор техн. наук, проф. Е. С. Кухаркин.	Раздел 9. Микропроцессоры и их применение — канд. техн. наук, доц. С. К. Козырев, канд. техн. наук, доц. С. Г. Обухов, канд. техн. наук, доц. Т. В. Ремизевич.	
Раздел 3. Методы расчета электрических цепей — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жуховицкий, доктор техн. наук, проф. В. Г. Миронов.	Раздел 10. Общие вопросы стандартизации и надежности электротехнического оборудования — канд. техн. наук В. М. Дмитриев, доктор техн. наук, проф. А. А. Липман.	
Раздел 4. Расчет электрических и магнитных полей — канд. техн. наук, доц. Б. Я. Жуховицкий, доктор техн. наук проф. В. А. Кузовкин, доктор техн. наук, проф. В. Г. Миронов.	Раздел 11. Эргатические системы — доктор техн. наук, проф. А. Ф. Дьяков.	
Раздел 5. Измерения электрических и магнитных величин — доктор техн. наук, проф. В. Н. Малиновский, доктор техн. наук, проф. В. Г. Сергеев.	Раздел 12. Основные правила оформления конструкторской документации — канд. техн. наук, доц. К. К. Александров, доц. Е. Г. Кузьмина.	
Раздел 6. Моделирование в электротехнике и электроэнергетике — доктор техн. наук, проф. В. А. Веников, канд. техн. наук, доц. С. Ю. Сыромятников.	Раздел 13. Промышленные шумы и промышленные радиопомехи — канд. техн. наук, проф. Н. В. Астахов, канд. техн. наук,	
Раздел 7. Инженерный эксперимент в электро-		

- проф. В. Т. Медведев, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. Ю. В. Полозок.
- Раздел 14. Диэлектрические материалы — канд. техн. наук, доц. А. С. Воробьев, ст. преподаватель Е. А. Мельников, канд. техн. наук, доц. С. В. Серебрянников.
- Раздел 15. Полупроводниковые материалы — канд. техн. наук, ст. научн. сотр. Н. И. Михалев, канд. техн. наук, проф. В. А. Филиков.
- Раздел 16. Проводниковые материалы — доктор техн. наук, проф. П. А. Арсеньев, канд. техн. наук, ст. научн. сотр. Л. И. Сурогин, канд. техн. наук, доц. А. П. Черкасов.
- Раздел 17. Магнитные материалы — канд. техн. наук, доц. В. М. Пузиков, доктор техн. наук, проф. В. Г. Сергеев.
- Раздел 18. Контроль качества и диагностика электротехнических материалов и изделий — канд. техн. наук, доц. Г. П. Гаев, доктор техн. наук, проф. В. В. Сухоруков.
- Раздел 19. Безопасность электрооборудования и электроустановок — доктор техн. наук, проф. П. А. Долин, канд. техн. наук, доц. А. В. Каралюнец, канд. техн. наук, проф. В. Т. Медведев, канд. техн. наук, доц. С. Г. Новиков.

Редактирование материалов первого тома осуществлено докторами техн. наук, профессорами В. Г. Герасимовым и А. И. Поповым.

Раздел 1

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

СОДЕРЖАНИЕ

1.1. Международная система единиц (СИ, SI). Основные единицы СИ (7). Дополни- тельные единицы СИ (7)	7	ной системе единиц (12). Единицы све- товых величин в Международной систе- ме единиц (12). Единицы величин, характеризующих ионизирующие излу- чения и радиоактивность в Междуна- родной системе единиц (13)	
1.2. Единицы механических величин. Системы единиц в механике (8). Еди- ницы механических величин в Между- народной системе единиц (8). Метри- ческие и неметрические единицы дли- ны, площади, объема, вместимости, мас- сы, скорости (8). Пересчет единиц энергии (8). Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ (10). Децибел и непер (10)	8	1.4. Единицы электрических и магнитных величин.	14
1.3. Единицы тепловых, акустических и све- товых величин, величин, характеризую- щих ионизирующие излучения и радиоактивность.	11	Единицы Международной системы еди- ниц (14)	
Единицы тепловых величин в Междуна- родной системе единиц (11). Единицы акустических величин в Междунаро-		1.5. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева	16
		1.6. Множители и приставки для образова- ния кратных и дольных единиц и их наименования.	17
		1.7. Важнейшие физические постоянные (фундаментальные константы).	17
		1.8. Буквенные обозначения основных элект- рических и магнитных величин.	18
		Список литературы.	19

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ, SI)

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

1. М е т р (м, m) — единица длины. Метр равен расстоянию, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ -ю долю секунды.

2. К и л о г р а м м (кг, kg) — единица массы. Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

3. С е к у н д а (с, s) — единица времени. Секунда равна $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133

4. А м п е р (А) — единица электрического тока. Ампер равен неизменяющемуся току по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывающему на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

5. К е л ь в и н (К) — единица термодинамической температуры. Кельвин равен $1/273,15$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Кроме температуры Кельвина (обозначение T) допускается применять также температуру Цель-

сия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К по определению. По значению градус Цельсия (обозначение $^{\circ}\text{C}$) равен кельвину.

6. М о л ь (моль, mol) — единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

7. К а н д е л а (кд, cd) — единица силы света. Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

1. Р а д и а н (рад, rad) — единица плоского угла. Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу ($1 \text{ рад} = 57^{\circ} 7' 44,8''$).

2. С т е р а д и а н (ср, sr) — единица телесного

угла. Стерadian равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

1.2. ЕДИНИЦЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ В МЕХАНИКЕ

В основу построения систем единиц в механике положены три основные независимые единицы. Первые две — единицы длины и времени. Системы, в которых в качестве третьей основной единицы взята единица массы, называют динамическими и часто еще абсолютными. Системы с третьей основной единицей единицей силы — называют статическими (табл. 1.1).

ЕДИНИЦЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

Выражение через единицы СИ может служить для проверки получаемых уравнений и для перехода к другим единицам. При этом необязательно выражать рассматриваемые единицы через основные. Поэтому в табл. 1.2 кроме выражений через основные единицы указаны и практически наиболее удобные формы.

МЕТРИЧЕСКИЕ И НЕМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ, ПЛОЩАДИ, ОБЪЕМА, ВМЕСТИМОСТИ, МАССЫ, СКОРОСТИ

Ниже приводятся единицы измерения, встречающиеся в отечественной литературе. Обозначения: устар. — устаревшая.

Измерение длины в других единицах

1 мк (микрон — устар.) = 1 микрометр (мкм) = 10^{-6} м = 10^{-4} см;
1 нм = 1 нанометр = 10^{-9} м = 10^{-6} мм;
1 м. миля (морская миля) = 1852 м (точно) — длина угловой минуты меридиана.

Измерение длины в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 мил (Mil) = 10^{-3} дюйма = 0,0254 мм;
1 дюйм (Inch) = 2,54 см;
1 фут (Foot) = 12 дюймам = 30,48 см;
1 ярд (Yard) = 3 футам = 91,44 см.

Измерение площади в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 квадратный фут = 144 квадратным дюймам = $929,03$ см²;

1 квадратный ярд = 9 квадратным дюймам = 8361 см²;
1 акр (Acre) = 43 560 квадратным футам = 4047 м²;
1 квадратная миля = 640 акрам = 259 га = $259 \cdot 10^4$ м².

Измерение объема в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 кубический дюйм (Cubic inch) = $16,4$ см³;
1 кубический фут = 1728 кубическим дюймам = $0,0283$ м³;
1 кубический ярд = 27 кубическим футам = $0,765$ м³.

Измерение вместимости для сыпучих тел и жидкостей в Великобритании

1 пинта (Pint) = 0,568 л;
1 кварта (Quart) = 2 пинтам = 1,136 л;
1 галлон (Gallon) = 4 квартам = 4,546 л;
1 бушель (Bushel) = 8 галлонам = 36,37 л.

Измерение вместимости в США

Для сыпучих тел

1 пинта = 0,55 л;
1 кварта = 1,10 л;
1 галлон = 4,40 л;
1 бушель = 35,24 л;
1 баррель = 115,6 л.

Для жидкостей

1 пинта = 0,47 л;
1 кварта = 0,95 л;
1 галлон = 3,78 л;
1 баррель = 159 л.

Измерение массы в мерах, применяемых в Великобритании и США

1 гран (Grain) = 64,8 мг;
1 унция (Ounce) = 28,35 г;
1 фунт (Pound) = 16 унциям = 453,6 г;
1 центнер (Centumweight) = 112 фунтам = 50,8 кг (в Великобритании);
1 центнер = 100 фунтам = 45,36 кг (в США).

Измерение скорости в других единицах

1 км/ч = 0,278 м/с;
1 уз (узел) = 1 морская миля в час = 1,852 км/ч = 0,514 м/с.

ПЕРЕСЧЕТ ЕДИНИЦ ЭНЕРГИИ

Единица	Дж	кВт · ч	ккал	эВ
Джоуль	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{18}$
Киловатт-час	$3,60 \cdot 10^6$	1	860,0	$2,25 \cdot 10^{25}$
Килокалория	$4,19 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1	$2,61 \cdot 10^{22}$
Электрон-вольт	$1,60 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	$3,83 \cdot 10^{-23}$	1

Пример. 1 Дж = $2,78 \cdot 10^{-7}$ кВт · ч.

Т а б л и ц а 1.1. Системы единиц в механике

Обозначение системы	Основные и производные единицы					
	длины	времени	массы	силы	работы	мощности
СИ, SI (или МКС, MKS)	1 м (метр)	1 с (секунда)	1 кг (килограмм)	$1 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 = 1 \text{ Н}$ (ньютон)	$1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}$ (джоуль)	$1 \text{ Дж}/\text{с} = 1 \text{ Вт}$ (ватт)

Т а б л и ц а 1.2. Единицы механических величин в Международной системе СИ

Величина	Размерность	Единица		
		Наименование	Обозначение	
			русское	международное
Длина	м	метр	м	m
Масса	кг	килограмм	кг	kg
Время, период	с	секунда	с	s
Площадь	м^2	квадратный метр	м^2	m^2
Объем, вместимость	м^3	кубический метр	м^3	m^3
Сила	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$	ньютон	Н	N
Плотность	$\text{кг}/\text{м}^3$	килограмм на кубический метр	$\text{кг}/\text{м}^3$	kg/m^3
Момент силы	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	ньютон-метр	$\text{Н} \cdot \text{м}$	$\text{N} \cdot \text{m}$
Работа, энергия	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	джоуль	Дж	J
Мощность	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3 = \text{Дж}/\text{с}$	ватт	Вт	W
Давление, механическое напряжение	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2) = \text{Н}/\text{м}^2$	паскаль	Па	Pa
Количество движения, импульс	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$	килограмм-метр в секунду	$\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}$	$\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}$
Момент количества движения, момент импульса	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с} = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	килограмм-квадратный метр в секунду	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$
Момент инерции (динамический момент инерции)	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	килограмм-квадратный метр	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Скорость	$\text{м}/\text{с}$	метр в секунду	$\text{м}/\text{с}$	m/s
Ускорение	$\text{м}/\text{с}^2$	метр на секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$	m/s^2
Угловая скорость	с^{-1}	радиан в секунду	$\text{рад}/\text{с}$	rad/s
Угловое ускорение	с^{-2}	радиан на секунду в квадрате	$\text{рад}/\text{с}^2$	rad/s^2
Частота периодического процесса*	с^{-1}	герц	Гц	Hz
Частота дискретных событий (частота импульсов, частота ударов и т.п.)	с^{-1}	секунда в минус первой степени	с^{-1}	s^{-1}
Динамическая вязкость	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$	паскаль-секунда	$\text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Кинематическая вязкость	$\text{м}^2/\text{с}$	квадратный метр на секунду	$\text{м}^2/\text{с}$	m^2 / s

* Допускается к применению единица частоты вращения: 1 оборот в минуту ($1 \text{ об}/\text{мин} = 1/60 \text{ с}^{-1} = \pi / 30 \text{ рад}/\text{с}$).

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ, ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ
НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		русское	международное	
Длина	астрономическая единица	а.е.	v.a.	$1,49598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	световой год	св.год	ly	$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	парсек	пк	pc	$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Масса	тонна	т	t	10^3 кг
	атомная единица массы	а.е.м.	u	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время	минута	мин	min	60 с
	час	ч	h	3600 с
	сутки	сут	d	86 400 с
Плоский угол	градус	...°	...°	$(\pi/180)$ рад $\approx 1,745\,329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...'	...'	$(\pi / 10\,800)$ рад $\approx 2,908\,882 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	...''	...''	$(\pi / 648\,000)$ рад $\approx 4,848\,137 \cdot 10^{-6}$ рад
Площадь	гектар	га	ha	10^4 м ²
Объем, вместимость	литр	л	l	10^{-3} м ³
Оптическая сила	диоптрия	дптр	–	1 м^{-1}
Энергия	электрон-вольт	эВ	eV	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)

Пр и м е ч а н и я: 1. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например: неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т.п.

2. Единицу литр не рекомендуется применять при точных измерениях.

3. Приведенные выше единицы времени, плоского угла, астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

ДЕЦИБЕЛ И НЕПЕР

Для характеристики изменения какой-либо величины, если она изменяется на несколько порядков, применяется десятичный или натуральный логарифм отношения двух значений этой величины. Например, в электротехнике постоянная ослабления четырехполосника, линии при согласованной нагрузке

$$A = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ дБ}; \quad A = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \text{ Нп},$$

где P_1 и P_2 — мощности на входе и выходе, или

$$A = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ дБ}; \quad A = \ln \frac{U_1}{U_2} \text{ Нп},$$

где U_1 и U_2 — напряжения на входе и выходе.

В обоих случаях полученная величина A безразмерная, но в первом случае указывается, что A измерена в децибелах (дБ), а во втором — в неперах (Нп). Разность уровней двух мощностей равна 1 дБ, если десятичный логарифм их отношения равен 0,1; разность уровней двух мощностей равна 1 Нп, если натуральный логарифм их отношения равен 2:

$$1 \text{ дБ} = 0,11512925 \text{ Нп}; \quad 1 \text{ Нп} = 8,6858896 \text{ дБ}.$$

1.3. ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОВЫХ, АКУСТИЧЕСКИХ И СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН, ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

ЕДИНИЦЫ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через основные единицы СИ	Обозначение единицы		Единицы в неметрической системе, основанной на калории			
			русское	международное	Содержит единиц неметрической системы	Наименование единицы	Обозначение единицы	Содержит единиц в системе СИ
Температура	кельвин	К	К	К	1	—	—	—
Количество теплоты, термодинамический потенциал, энтальпия	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Дж	Дж	0,239	калория (международное)	кал	4,1868 (точно)
Теплоемкость системы, энтропия	джоуль на кельвин	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$	Дж/К	Дж/К	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на кельвин	ккал/К	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	джоуль на килограмм-кельвин	$\text{м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$	Дж/(кг · К)	Дж/(кг · К)	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм-кельвин	ккал/(кг · К)	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельное количество теплоты, удельный термодинамический потенциал	джоуль на килограмм	$\text{м}^2/\text{с}^2$	Дж/кг	Дж/кг	$0,239 \cdot 10^{-3}$	килокалория на килограмм	ккал/кг	$4,1868 \cdot 10^3$
Градиент температуры	кельвин на метр	К / м	К/м	К/м	1	—	—	1
Тепловой поток	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$	Вт	Вт	0,860	килокалория в час	ккал/ч	1,163
Поверхностная плотность теплового потока	ватт на квадратный метр	$\text{Вт}/\text{м}^2$	Вт/м ²	Вт/м ²	0,860	килокалория в час на квадратный метр	ккал/(м ² · ч)	1,163
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	$\text{кг} \cdot \text{м}/(\text{с}^3 \cdot \text{К})$	Вт/(м · К)	Вт/(м · К)	0,860	килокалория в час на метр-кельвин	ккал/(ч · м · К)	1,163
Коэффициент теплопередачи, теплообмена	ватт на квадратный метр-кельвин	$\text{Вт}/(\text{с}^3 \cdot \text{К})$	Вт/(м ² · К)	Вт/(м ² · К)	0,860	килокалория на квадратный метр-час-кельвин	ккал/(м ² · ч · К)	1,163
Температуропроводность	квадратный метр на секунду	$\text{м}^2/\text{с}$	м ² /с	м ² /с	1	—	—	1
Температурный коэффициент	кельвин в минус первой степени	К ⁻¹	К ⁻¹	К ⁻¹	1	—	—	1

Примечания: 1. Так как разность температур может выражаться не только в кельвинах, но и в градусах Цельсия, то во всех наименованиях и обозначениях можно осуществлять соответствующую замену без изменения коэффициента пересчета.

2. Сравнение температурных шкал $t^{\circ}\text{C} = 0,555 (t^{\circ}\text{F} - 32)$; $t^{\circ}\text{C} = T - 273,15$, где $t^{\circ}\text{C}$ — температура в градусах Цельсия; $t^{\circ}\text{F}$ — температура в градусах по шкале Фаренгейта; T — температура в кельвинах (единицах термодинамической температуры).

ЕДИНИЦЫ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Звуковое давление	паскаль	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2) = \text{Н}/\text{м}^2$	Па	Pa
Акустическое сопротивление	паскаль-секунда на кубический метр	$\text{кг}/(\text{м}^4 \cdot \text{с})$	$\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$	$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$
Удельное акустическое сопротивление	паскаль-секунда на метр	$\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$
Механическое сопротивление	ньютон-секунда на метр	$\text{кг}/\text{с}$	$\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}$	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
Звуковая энергия	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Дж	J
Поток звуковой энергии, звуковая мощность	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3 = \text{Дж}/\text{с}$	Вт	W
Интенсивность звука	ватт на квадратный метр	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2
Плотность звуковой энергии	джоуль на кубический метр	$\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$	$\text{Дж}/\text{м}^3$	J/m^3

П р и м е ч а н и е. При записи уровней звукового давления, звуковой мощности и интенсивности звука в децибелах (дБ) применяются соответственно следующие исходные значения: $2 \cdot 10^{-5}$ Па; 10^{-12} Вт и 10^{-12} Вт/м².

ЕДИНИЦЫ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Сила света	кандела	кд	кд	cd
Световой поток	люмен	$\text{кд} \cdot \text{ср}$	лм	lm
Световая энергия	люмен-секунда	$\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{с}$	$\text{лм} \cdot \text{с}$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
Освещенность	люкс	$\text{кд} \cdot \text{ср}/\text{м}^2$	лк	lx
Светимость	люмен на квадратный метр	$\text{кд} \cdot \text{ср}/\text{м}^2$	$\text{лм}/\text{м}^2$	lm/m^2
Яркость	кандела на квадратный метр	$\text{кд}/\text{м}^2$	$\text{кд}/\text{м}^2$	cd/m^2
Световая экспозиция	люкс-секунда	$\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	$\text{лк} \cdot \text{с}$	$\text{lx} \cdot \text{s}$
Энергия излучения	джоуль	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$	Дж	J
Поток излучения, мощность излучения	ватт	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$	Вт	W
Световой эквивалент потока излучения	люмен на ватт	$\frac{\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{с}^3}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}$	$\text{лм}/\text{Вт}$	lm/W
Поверхностная плотность потока излучения	ватт на квадратный метр	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2
Энергетическая сила света (сила излучения)	ватт на стерадиан	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/(\text{с}^3 \cdot \text{ср})$	$\text{Вт}/\text{ср}$	W/sr
Энергетическая яркость	ватт на стерадиан-квадратный метр	$\text{кг}/(\text{с}^3 \cdot \text{ср})$	$\text{Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$
Энергетическая освещенность (облученность)	ватт на квадратный метр	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2
Энергетическая светимость (излучаемость)	ватт на квадратный метр	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2

ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИН, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИОАКТИВНОСТЬ В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через единицы СИ	Обозначение единицы		Содержит единиц других систем
			русское	международное	
Активный нуклид	беккерель	с^{-1}	Бк	Bq	$2,703 \cdot 10^{-11}$ Ки (кюри)
Плотность потока (интенсивность) энергии ионизирующего излучения	ватт на квадратный метр	$\text{кг}/\text{с}^3$	$\text{Вт}/\text{м}^2$	W/m^2	—
Поглощенная доза излучения, керма	грэй	$\text{Дж}/\text{кг}$ $(\text{м}^2/\text{с}^2)$	Гр	Gy	100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения, мощность кермы	грэй в секунду	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ $(\text{м}^2/\text{с}^3)$	Гр/с	Gy/s	100 рад/с
Эквивалентная доза излучения	зиверт**	$\text{м}^2/\text{с}^2$	Зв	Sv	100 бэр
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучения	кулон на килограмм	$\text{А} \cdot \text{с}/\text{кг}$	Кл/кг	C/kg	$3,876 \cdot 10^3$ Р (рентген)
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения	ампер на килограмм	$\text{А}/\text{кг}$	$\text{А}/\text{кг}$	$\text{А}/\text{кг}$	$3,876 \cdot 10^3$ Р/с

* Допускались к применению до 01.01.1980 г. следующие единицы: 1 кюри (Ки) = $3,70 \cdot 10^{10}$ Бк (точно); 1 рентген (Р) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно) — доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 см^3 воздуха образуется $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов; 1 рад = 10^{-2} Гр (Дж/кг) — излучения, при котором каждый килограмм массы вещества поглощает 0,01 Дж энергии; 1 бэр = 0,01 Зв — доза любого излучения, которая производит такое же биологическое действие, как 1 рентген.

** Зиверт равен одному грею на коэффициент качества (1 Гр/К). Безразмерный коэффициент качества К определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах, т.е. регламентированные значения относительной биологической эффективности излучения [1.6].

1.4. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через основные единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Электрические				
Электрический ток	ампер	A	A	A
Количество электричества, электрический заряд	кулон	A · с	Кл	C
Электрический потенциал, напряжение, ЭДС	вольт	кг · м ² / (А · с ³)	B	V
Напряженность электрического поля	вольт на метр	кг · м / (А · с ³)	B/м	V/м
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	А ² · с ⁴ / (кг · м ³)	Ф/м	F/м
Электрический момент диполя	кулон-метр	A · с · м = Кл · м	Кл · м	C · м
Электрическое смещение (электрическая индукция)	кулон на квадратный метр	A · с / м ² = Кл/м ²	Кл/м ²	C/м ²
Поляризованность	кулон на квадратный метр	A · с / м ² = Кл/м ²	Кл/м ²	C/м ²
Электрическая емкость	фарад	А ² · с ⁴ / (кг · м ²) = с/Ом А/м ²	Ф	F
Плотность тока поверхностная	ампер на квадратный метр	А/м ²	А/м ²	А/м ²
Электрическое сопротивление	ом	кг · м ² / (А ² · с ³) = В/А	Ом	Ω
Электрическая проводимость	сименс	А ² · с ³ / (кг · м ²) = 1/Ом	См	S
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	кг · м ³ / (А ² · с ³) = Ом · м	Ом · м	Ω · м
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	А ² · с ³ / (кг · м ³) = 1 / (Ом · м)	См · м	S · м
Подвижность носителей заряда	метр в секунду, деленный на вольт на метр	A · с ² / кг = м ² / (В · с)	м/с В/м	м/с V/м

Окончание таблицы

Наименование величины	Наименование единицы	Выражение через основные единицы СИ	Обозначение единицы	
			русское	международное
Мощность электрической цепи: полная активная реактивная	вольт-ампер ватт вольт-ампер реактивный	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$	$\text{В} \cdot \text{А}$ Вт вар	$\text{В} \cdot \text{А}$ W var
<i>Магнитные</i>				
Магнитный поток	вебер	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с}$	Вб	Wb
Магнитная индукция	тесла	$\text{кг} / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}^2$	Тл	Т
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	$\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{А}^2 \cdot \text{с}^2)$	Гн/м	Н/м
Магнитный момент электрического тока, магнитный момент диполя	ампер-квадратный метр	$\text{А} \cdot \text{м}^2$	$\text{А} \cdot \text{м}^2$	$\text{А} \cdot \text{м}^2$
Намагниченность	ампер на метр	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$	$\text{А} / \text{м}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{А}^2 \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{А} = \text{Вб} / \text{А} = \text{Ом} \cdot \text{с}$	Гн	Н
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер	А	А	А
Магнитное сопротивление	ампер на вебер	$\text{с}^2 \cdot \text{А}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{кг}) = \text{А} / \text{Вб} = 1 / \text{Гн}$	А/Вб	А/Wb
Магнитная проводимость	вебер на ампер	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{А}^2) = \text{Гн}$	Вб/А	Wb/А
Магнитный векторный потенциал	вебер на метр	$\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{А} \cdot \text{с}^2) = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}$	Вб/м	Wb/м

1.5. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H 1,00794 водород							2 He 4,00260 гелий
2	3 Li 6,941 литий	4 Be 9,01218 бериллий	5 B 10,81 бор	6 C 12,011 углерод	7 N 14,0067 азот	8 O 15,9994 кислород	9 F 18,998403 фтор	10 Ne 20,179 неон
3	11 Na 22,98977 натрий	12 Mg 24,305 магний	13 Al 26,98154 алюминий	14 Si 28,0855 кремний	15 P 30,97376 фосфор	16 S 32,06 сера	17 Cl 35,453 хлор	18 Ar 39,948 аргон
4	19 K 39,0983 калий	20 Ca 40,08 кальций	21 Sc 44,9559 скандий	22 Ti 47,90 титан	23 V 50,9415 ванадий	24 Cr 51,996 хром	25 Mn 54,9380 марганец	26 Fe 55,847 железо
	29 Cu 63,546 медь	30 Zn 65,38 цинк	31 Ga 69,72 галлий	32 Ge 72,59 германий	33 As 74,9216 мышьяк	34 Se 78,96 селен	35 Br 79,904 бром	36 Kr 83,80 криптон
5	37 Rb 85,4678 рубидий	38 Sr 87,62 стронций	39 Y 88,9056 иттрий	40 Zr 91,22 цирконий	41 Nb 92,9064 ниобий	42 Mo 95,94 молибден	43 Tc 98,9062 технеций	44 Ru 101,07 рутений
	47 Ag 107,8682 серебро	48 Cd 112,41 кадмий	49 In 114,82 индий	50 Sn 118,69 олово	51 Sb 121,75 сурьма	52 Te 127,60 теллур	53 I 126,9045 йод	54 Xe 131,30 ксенон
6	55 Cs 132,9054 цезий	56 Ba 137,33 барий	57* La 138,9055 лантан	72 Hf 178,49 гафний	73 Ta 180,9479 тантал	74 W 183,85 вольфрам	75 Re 186,207 рений	76 Os 190,2 осмий
	79 Au 196,9665 золото	80 Hg 200,59 ртуть	81 Tl 204,37 таллий	82 Pb 207,2 свинец	83 Bi 208,9804 висмут	84 Po [209] полоний	85 At [210] астат	86 Rn [222] радон
7	87 Fr [223] франций	88 Ra 226,0254 радий	89** Ac [227] актиний	104 Ku [261] курчатовий	105 (Ns) (нильсборий)	В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых изотопов. В круглых скобках — общепринятые символы и названия.		
* Лантаноиды								
58 Ce 140,12 церий	59 Pr 140,9077 празеодим	60 Nd 144,24 неодим	61 Pm [145] прометий	62 Sm 150,4 самарий	63 Eu 151,96 европий	64 Gd 157,25 гадолиний		
65 Tb 158,9254 тербий	66 Dy 162,50 диспрозий	67 Ho 164,9304 гольмий	68 Er 167,26 эрбий	69 Tm 168,9342 тулий	70 Yb 173,04 иттербий	71 Lu 174,967 лютеций		
** Актиноиды								
90 Th 232,0381 торий	91 Pa 231,0359 протактиний	92 U 238,029 уран	93 Np 237,0482 нептуний	94 Pu [244] плутоний	95 Am [243] америй	96 Cm [247] курий		
97 Bk [247] берклий	98 Cf [251] калifornий	99 Es [254] эйнштейний	100 Fm [257] фермий	101 Md [258] менделевий	102 (No) [255] (нобелий)	103 (Lr) [256] лоуренсий		

1.6. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Наименование приставки	Обозначение приставки		Множитель (отношение к главной единице)	Наименование приставки	Обозначение приставки		Множитель (отношение к главной единице)
	русское	международное			русское	международное	
экса	Э	E	10^{18}	деци	д	d	10^{-1}
пета	П	P	10^{15}	санتي	с	c	10^{-2}
тера	Т	T	10^{12}	милли	м	m	10^{-3}
гига	Г	G	10^9	микро	мк	μ	10^{-6}
мега	М	M	10^6	нано	н	n	10^{-9}
кило	к	k	10^3	пико	п	p	10^{-12}
гекто	г	h	10^2	фемто	ф	f	10^{-15}
дека	да	da	10^1	атто	а	a	10^{-18}

П р и м е р ы: 1 килоом = 1 кОм = 1000 Ом = 10^3 Ом; 1 миллиампер = 1 мА = 10^{-3} А; 1 микрофарад = 1 мкф = 10^{-6} ф.

П р и м е ч а н и я: 1. Присоединение к наименованию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы «микро- микрофарад» следует писать наименование «пикофарад».

2. Кратные и дольные единицы следует выбирать таким образом, чтобы числовые значения величины находились в интервале от 0,1 до 1000.

1.7. ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ (ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОНСТАНТЫ)

Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c_0^2 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м-}$$

$$= \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м,}$$

где $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Волновое сопротивление вакуума

$$\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376,7 \text{ Ом.}$$

Гравитационная постоянная

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

Ускорение свободного падения

$$g_n = 9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Элементарный заряд (заряд электрона)

$$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Масса покоя электрона

$$m_e = 9,1093897 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Отношение заряда электрона к его массе

$$e/m_e = 1,7588195 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

Масса покоя протона

$$m_p = 1,672631 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса покоя нейтрона

$$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса атома водорода

$$1,6735595 \cdot 10^{-24} \text{ кг.}$$

Отношение масс протона и электрона

$$m_p/m_e = 1836,1527.$$

Магнетон Бора

$$eh/(4\pi m_e) = \mu_B = 9,274078 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.}$$

Масса покоя мюона

$$m_\mu = 1,883566 \cdot 10^{-28} \text{ кг.}$$

Отношение массы мюона к массе электрона

$$m_\mu/m_e = 206,768262.$$

Ядерный магнетон

$$\mu_N = eh/(4\pi m_p) = 5,050824 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент электрона

$$\mu_e = 9,284832 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент протона

$$\mu_p = 1,4106171 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл.}$$

Магнитный момент мюона

$$\mu_\mu = 4,490474 \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл.}$$

Отношение магнитного момента электрона к магнитному моменту протона

$$\mu_e/\mu_p = 658,21068.$$

Отношение магнитного момента мюона к магнитному моменту протона

$$\mu_\mu/\mu_p = 3,1833402.$$

Первая постоянная излучения

$$c_1 = 2\pi\hbar c_0^2 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2.$$

Вторая постоянная излучения

$$c_2 = \hbar c_0/k = 0,01438786 \text{ м} \cdot \text{К.}$$

Постоянная Джозефсона

$$K_{J-90} = 483597,9 \text{ ГГц/В}$$

(для воспроизведения единицы напряжения).

Постоянная Клитцинга

$$R_{K-90} = 25812,807 \text{ Ом}$$

(для воспроизведения единицы электрического сопротивления).

Постоянная Зоммерфельда

$$\alpha = 7,29735308 \cdot 10^{-3}$$

(относительная погрешность $4,5 \cdot 10^{-8}$).

Постоянная Планка

$$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

(относительная погрешность $6,0 \cdot 10^{-7}$),

$$\hbar = h / 2\pi = 1,05457266 \cdot 10^{-34}$$

Постоянная Больцмана

$$k = R/N_A = 1,38066582 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Постоянная Стефана — Больцмана

$$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

Постоянная Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К.}$$

Универсальная газовая постоянная

$$R = pV/T = 8,31441 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}.$$

Температурный коэффициент объемного расширения идеальных газов

$$\alpha = 0,00366 \text{ К}^{-1}.$$

Число (постоянная) Авогадро

$$N_A = 6,0221367 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

(относительная погрешность $5,9 \cdot 10^{-7}$).

Число Лошмидта

$$N_L = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Число (постоянная) Фарадея

$$F = N_A e = 96485,309 \text{ Кл/моль}.$$

1.8. БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

В качестве буквенных обозначений величин должны применяться буквы латинского и греческого алфавитов при необходимости с нижним и (или) верхними индексами.

Для изменяющихся во времени электрических величин — ЭДС, напряжения, заряда, тока, плотности тока следует применять обозначения: a — мгновенное значение; A — действующее значение (для периодически изменяющихся величин); A_m — амплитуда (для гармонически изменяющихся величин). Здесь под a , A , A_m понимается любая из перечисленных выше изменяющихся величин.

Операторные величины следует обозначать по типу: $I(p)$ или $I(s)$ — операторный ток.

Комплексные величины следует обозначать по типу:

$$\underline{A} = A' + jA'' = \text{Re } \underline{A} + j \text{Im } \underline{A} = \\ = A e^{j\alpha} = |\underline{A}| e^{j\alpha} = A < \alpha = |\underline{A}| < \alpha,$$

где $\underline{A}$ — любая из комплексных величин; $A' = \text{Re } \underline{A}$ — ее действительная часть; $A'' = \text{Im } \underline{A}$ — ее мнимая часть; $A = |\underline{A}|$ — модуль и α — аргумент комплексной величины.

Сопряженная комплексная величина

$$\underline{A}^* = A' - jA'' = \text{Re } \underline{A} - j \text{Im } \underline{A} = \\ = A e^{-j\alpha} = |\underline{A}| e^{-j\alpha} = A < -\alpha = |\underline{A}| < -\alpha.$$

Для комплексной величины, каждая из составляющих которой имеет собственное буквенное обозначение, следует применять обозначения типа:

$$\underline{Z} = \text{Re } \underline{Z} + j \text{Im } \underline{Z} = R + jX,$$

где Z — комплексное сопротивление; R — активное и X — реактивное сопротивления.

Допускается модули комплексных величин, не являющихся изображениями функций времени, обозначать строчными буквами.

Для основных электрических и магнитных величин должны применяться следующие обозначения:

Латинский алфавит

A	плотность тока линейная; потенциал
$\mathbf{B}$	магнитный векторный
B	индукция магнитная
B, b	проводимость реактивная
C	емкость
c	скорость распространения электромагнитных волн (c_0 — в вакууме)
D	смещение электрическое
E	напряженность электрического поля
E, e	электродвижущая сила (ЭДС)
F	магнитодвижущая сила (МДС)
f	частота колебаний (f_0 — резонансная)
G, g	проводимость активная
H	напряженность магнитного поля; передаточная функция
I, i	ток
J	плотность тока
k	коэффициент связи
L	индуктивность собственная
M	индуктивность взаимная; намагниченность
m	магнитный момент; число фаз многофазной системы цепей
N	коэффициент размагничивания
n	коэффициент трансформации; отношение чисел витков
P	мощность; активная мощность; поляризованность
p	момент электрический; мощность удельная; число пар полюсов
Q	добротность; мощность реактивная
Q, q	заряд
R, r	сопротивление электрическое; сопротивление активное
S	мощность полная
T	период колебаний
U, u	напряжение
W	энергия электромагнитная
w	число витков; энергия электромагнитная удельная
X, x	сопротивление реактивное
Y, y	проводимость полная
Z, z	сопротивление полное

Греческий алфавит

Λ	постоянная ослабления
α	коэффициент ослабления (Нп/м)
β	постоянная фазы
β	коэффициент фазы (рад/м)
Γ	постоянная передачи
γ	коэффициент распространения; проводимость удельная электрическая

δ	— коэффициент затухания (с^{-1}); угол потерь
ϵ_a	— абсолютная диэлектрическая проницаемость
ϵ_r	— относительная диэлектрическая проницаемость
ϵ_0	— электрическая постоянная
θ	— декремент колебаний логарифмический
α	— восприимчивость магнитная
λ	— длина электромагнитной волны; коэффициент мощности
μ_a	— абсолютная магнитная проницаемость
μ_r	— относительная магнитная проницаемость
μ_0	— магнитная постоянная
Π	— вектор Пойнтинга
ρ	— коэффициент отражения; плотность электрического заряда; сопротивление электрическое удельное
σ	— плотность электрического заряда поверхностная; проводимость электрическая удельная
τ	— плотность электрического заряда линейная; постоянная времени
Φ	— магнитный поток
φ	— потенциал электрический; сдвиг фаз между напряжением и током
χ	— восприимчивость диэлектрическая
Ψ	— потокосцепление
Ω, ω	— частота колебаний угловая

Примеры применения индексов

Z_0	— волновое сопротивление
$R_{\text{вт}}$	— внутреннее сопротивление
Z_c	— характеристическое сопротивление
$U_{\text{вх}}$	— входное напряжение
$U_{\text{вых}}$	— выходное напряжение
$C_{\text{дин}}$	— емкость динамическая
$L_{\text{диф}}$	— индуктивность дифференциальная
R_k	— сопротивление короткого замыкания
W_m	— энергия магнитная

I_m	— амплитудное значение тока
I_{max}	— максимальное значение тока
I_{min}	— минимальное значение тока
I_k	— ток короткого замыкания
I_{Σ}	— суммарный ток
U_{Φ}	— фазное напряжение
r_x	— сопротивление холостого хода
$a_* = a/a_0$	— отнесенная к базисному значению (a_0) величина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.1. Единицы физических величин. ГОСТ 8.417-81 (СТ СЭВ 1052-78) (см. также РД 50-160-79. Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052-78).
- 1.2. ГСССД 1-76. Фундаментальные физические константы.
- 1.3. ГОСТ 1494-77. (СТ СЭВ 3231-81). Электротехника. Буквенные обозначения основных величин.
- 1.4. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980.
- 1.5. Глебов Г. Д. Единицы физических величин в электронике. М.: Высшая школа, 1983.
- 1.6. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- 1.7. Олейникова Л. Д. Единицы физических величин в энергетике (Точность воспроизведения и передачи): Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 1.8. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева// Химический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
- 1.9. Сена Л. А. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977.
- 1.10. Чертов А. Г. Единицы физических величин. М.: Высшая школа, 1977.
- 1.11. Стоцкий Л. Р. Физические величины и их единицы: Справочник. М.: Просвещение, 1984.

Раздел 2

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ЭЛЕКТРОФИЗИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

2.1. Электромагнитные явления в проводниках и полупроводниках.	20	ные свойства сверхпроводников (29). Слабосвязанные сверхпроводники (31)	
Электр проводимость проводников и полупроводников (20). Контактные явления (21). Термоэлектрические и термомагнитные явления (22) Гальваномангнитные явления (24). Магнитооптические явления (25). Внутренний фотоэффект (26). Люминесценция (26)		2.3. Электромагнитные явления в проводящей движущейся среде.	32
2.2. Сверхпроводимость.	27	Уравнения магнитогидродинамики (32). «Вмороженность» и «диффузия» магнитного поля (32). Магнитное давление, электромагнитные насосы и ускорители (33)	
Основные сведения (27). Электромагнит-		2.4. Основы квантовой электроники.	34
		Список литературы	37

2.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДНИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРОВОДНИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ*

Свойство вещества создавать под действием неизменяющегося во времени электрического поля неизменяющийся во времени электрический ток называется электропроводностью. Электрическим током проводимости называется направленное движение свободных носителей электрического заряда в веществе или в вакууме. Носителями заряда в металлах являются электроны, в электролитах — ионы и электроны, в полупроводниках — электроны и дырки.

Максимальная энергия, которую могут иметь электроны при температуре $T = 0 \text{ K}$, называют энергией Ферми $W_F = e \varphi_F$. При температуре $T > 0 \text{ K}$ энергия Ферми соответствует такому энергетическому уровню, вероятность заполнения которого равна $1/2$. Потенциал Ферми φ_F , или электрохимический потенциал, равен сумме электрического и химического потенциалов: $\varphi_F = \varphi_E + \varphi_X$. Химический потенциал является однозначной функцией концентрации частиц, поэтому он характеризует возможность диффузии частиц. Наличие разности химических потенциалов означает наличие разности концентраций, а разность концентраций вызывает диффузию частиц в направлении от большей концентрации к меньшей. Электрический потенциал характеризует возможность дрейфа заряженных свободных частиц во внешнем электрическом поле. Градиент энергии Ферми характеризует оба типа движения носителей — диффузию и дрейф. В условиях равновесия, когда нет направленного движения носителей заряда, градиент энергии Ферми равен нулю. Постоянство («горизонтальность») уровня Ферми в равновесной системе является одним из фундаментальных положений теории твердого тела.

Согласно квантовой теории удельная электрическая проводимость проводников $\gamma = ne^2 \lambda / (m_i u)$, где m , n и e — масса, концентрация и заряд свободных электронов; λ — средняя длина пробега свободного электрона, обладающего энергией Ферми; u — средняя скорость свободного электрона.

Энергия в изолированном атоме имеет дискретные значения, или уровни. В твердом теле вместо системы дискретных уровней энергии появляется система энергетических зон. Каждая из зон состоит из столь близко расположенных уровней, что не имеет смысла говорить о принадлежности валентных электронов к определенным атомам. Они становятся «обобщественными», коллективизированными.

В основе классификации электротехнических материалов лежит структура зон твердого тела при абсолютном нуле температуры. У проводников зона проводимости и валентная зона перекрываются и даже при нулевой температуре значительное количество электронов находится в зоне проводимости, что обуславливает электропроводность проводников.

Зонные структуры полупроводников и диэлектриков таковы, что валентная зона при нулевой температуре полностью заполнена электронами и ближайшая расположенная выше разрешенная зона (зона проводимости) отделена от нее запрещенной зоной. Разница между полупроводниками и диэлектриками заключается в ширине запрещенной зоны ΔW_z . Если для диэлектриков ΔW_z достигает нескольких электрон-вольт (например, для алмаза $\Delta W_z = 5,6 \text{ эВ}$), то для полупроводников она значительно меньше: для германия $\Delta W_z = 0,67 \text{ эВ}$, для кремния $\Delta W_z = 1,11 \text{ эВ}$.

Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости может происходить под воздействием тепловой или световой энергии, под действием электрического поля или какого-либо корпускулярного излучения. Для такого перехода воздействия должна быть равна ширине запрещенной зоны или превосходить ее ($h\nu \geq \Delta W_z$). Вероятность перехода электрона в зону проводимости под воздействием теплоты является экспоненциальной функцией температуры:

$$f = e^{-\Delta W_z / kT},$$

где k — постоянная Больцмана.

Для низких температур эта вероятность мала, и полупроводники при температурах, близких к $T = 0 \text{ K}$, ведут себя как диэлектрики. Однако уже при комнатной температуре концентрация электронов в зоне проводимости значительна. Так, у германия $n \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

При переходе электронов в зону проводимости в валентной зоне образуются вакантные квантовые состояния (дырки), которые ведут себя в кристаллической решетке подобно положительно заряженной частице с тем же зарядом, что и электроны.

Нелегированные полупроводники, в которых концентрации электронов и дырок равны, называются собственными. Перенос электрических зарядов в таких полупроводниках при воздействии электрического поля осуществляется электронами и дырками, и электропроводность их называется собственной.

Удельная электрическая проводимость полупроводников

$$\gamma = e n \mu_n + e p \mu_p,$$

где e — заряд электрона; n и p — концентрации электронов и дырок в полупроводнике; μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок.

Легирование собственного полупроводника примесью существенно влияет на его удельную электрическую проводимость. Примесь нарушает периодичность кристаллической решетки и образует в энергетическом спектре полупроводника дополнительные уровни, которые располагаются в запрещенной зоне. Если энергетический уровень примеси находится вблизи дна зоны проводимости, то в этом случае более вероятным является переход электронов с уровней примеси в зону проводимости. Концентрация свободных электронов в таких полупроводниках увеличивается и становится существенно больше концентрации дырок. Такие примеси называются донорными. Электропроводность полупроводников, легированных донорной

* Подпараграфы «Электропроводность проводников и полупроводников» и «Контактные явления» написаны совместно с проф. А. Н. Старостиним.

примесью, осуществляется главным образом электронами и поэтому называется электронной, или *n*-типа (*negativ* — отрицательный). Электроны в таких полупроводниках являются основными носителями, дырки — неосновными.

Если уровни электронов атомов примеси располагаются вблизи валентной зоны, то под действием тепловой энергии валентные электроны могут переходить на уровни примеси, где они становятся связанными. В этом случае увеличивается концентрация дырок. Такие примеси называются акцепторными. Электропроводность полупроводников, легированных акцепторными примесями, осуществляется главным образом дырками и называется дырочной, или *p*-типа (*positiv* — положительный). Дырки в таких полупроводниках являются основными носителями, а электроны — неосновными.

При одновременном введении в полупроводник донорной и акцепторной примесей характер электропроводности будет определяться примесью, имеющей более высокую концентрацию.

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Контактными называются физические явления, возникающие в области соприкосновения разнородных тел.

Контакт двух металлов. Если два разнородных металла с энергией Ферми W_1 и W_2 привести в соприкосновение, то электроны проводимости частично переходят из одного металла в другой (с большей работой выхода A_1). При этом смещаются энергетические уровни электронов и выравниваются электрохимические потенциалы:

$$W_1 - e\varphi_1 = W_2 - e\varphi_2.$$

Разность химических потенциалов приводит к возникновению внутренней контактной разности потенциалов $U_{\text{вн}} = \varphi_1 - \varphi_2 = (W_1 - W_2)/e$. Эта разность зависит от температуры вследствие смещения уровня Ферми

$$W_F(T) = W_F(0) \left[1 - \frac{1}{12} \left(\frac{\pi kT}{W_F(0)} \right)^2 \right].$$

Разность работ выхода электронов из соприкасающихся металлов определяет внешнюю контактную разность потенциалов $U_k = (A_2 - A_1)/e$, которая для разных пар металлов колеблется от десятых долей до единичного вольт и сильно зависит от состояния поверхности.

Контакт металла с полупроводником. Свойства контактов сильно зависят от расположения уровней Ферми в них.

Если $W_{Fm} > W_{Fp}$ или $W_{Fm} < W_{Fn}$, то после соприкосновения слоев часть электронов из металла перейдет в полупроводник *p*-типа или из полупроводника *n*-типа в металл соответственно. Возникающее на границе электрическое поле препятствует дальнейшему переходу электронов. При этом уменьшается концентрация основных носителей заряда в граничном слое полупроводника по сравнению с концентрацией их в объеме вдали от границы контакта и, следовательно, увеличивается сопротивление граничного слоя. Такой слой называется «запирающим». В зависимости от прило-

женного внешнего напряжения и его полярности изменяется сопротивление граничного слоя. Например, если вектор напряженности электрического поля направлен от металла к проводнику *n*-типа (металл соединен с положительным полюсом источника напряжения, а полупроводник — с отрицательным), то электроны втягиваются из объема полупроводника в контактный слой, что приводит к уменьшению его толщины и увеличению электрической проводимости. В этом направлении, называемом проводящим, возможен электрический ток через контакт. Если же изменить полярность приложенного напряжения, то электроны будут вытесняться из полупроводника, увеличивая толщину запирающего слоя и его электрическое сопротивление. В этом направлении тока через контакт нет. Таким образом, контакт металла с полупроводником обладает односторонней проводимостью — вентильными свойствами. На их основе созданы диоды Шоттки.

Если $W_{Fm} < W_{Fp}$ или $W_{Fm} > W_{Fn}$, то граничные слои полупроводника обогащаются основными носителями заряда и сопротивление граничного слоя уменьшается по сравнению с остальным объемом полупроводника. Суммарное сопротивление системы будет близко к сопротивлению нейтрального слоя полупроводника и не будет зависеть от внешнего напряжения и его полярности. Такие невыпрямляющие переходы являются основой электрических контактов.

Контакт электронного и дырочного полупроводников. Структура такого контакта показана на рис. 2.1, а, б. Концентрация электронов n_n в полупроводнике *n*-типа много больше концентрации электронов n_p в полупроводнике *p*-типа, а концентрация дырок p_p в полупроводнике *p*-типа много больше концентрации дырок p_n в полупроводнике *n*-типа. Наличие градиента концентраций на границе двух полупроводников создает диффузию электронов из слоя *n* в слой *p*, а дырок из слоя *p* в слой *n*. Диффузия основных носителей заряда приводит к тому, что в приконтактной зоне полупроводника *n*-типа образуется нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси, а в полупроводнике *p*-типа — нескомпенсированный отрицательный заряд ионов акцепторной примеси.

Таким образом, в приконтактной зоне полупроводников различного типа образуется двойной электрический слой, который имеет малую концентрацию подвижных носителей заряда и обладает поэтому большим сопротивлением. График распределения плотности пространственного заряда в идеализированном виде приведен на рис. 2.1, в. На внешней границе и в глубине полупроводников заряд равен нулю, а в приконтактных зонах полупроводников *n*- и *p*-типов определяется соответственно концентрациями атомов донорной N_d и акцепторной N_a примесей.

Двойной электрический слой, образующийся на границе электронного и дырочного полупроводников в результате диффузии основных носителей называется электронно-дырочным переходом (*p-n* переходом).

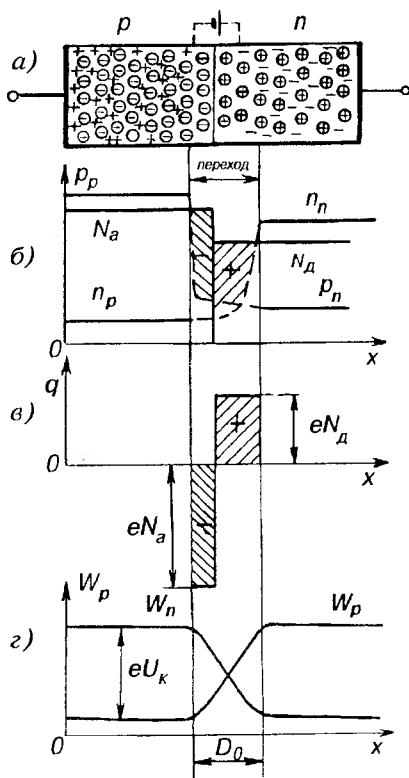


Рис. 2.1. Структура электронно-дырочного перехода в состоянии термодинамического равновесия:

а — распределение носителей заряда в полупроводниках p - и n -типов в условиях контакта, но при отсутствии внешнего электрического поля; б — распределение концентраций акцепторной и донорной примесей, а также концентраций основных и неосновных носителей заряда; в — распределение плотности пространственного заряда; г — изменение потенциальных энергий электронов W_n и дырок W_p

Протяженность двойного электрического слоя характеризуется толщиной p - n перехода D_0 (рис. 2.1, г).

В зоне p - n перехода существует электрическое поле, напряженность которого направлена от полупроводника n -типа к полупроводнику p -типа. Это поле препятствует процессу диффузии основных носителей заряда и вызывает дрейф неосновных носителей заряда. На рис. 2.1, г приведены графики потенциальной энергии дырок и электронов. В глубине дырочного полупроводника потенциальная энергия дырок W_p равна некоторому постоянному значению, а при приближении к зоне p - n перехода энергия W_p начинает расти за счет потенциальной энергии электрического поля p - n перехода. В глубине слоя n -типа потенциальная энергия дырок максимальна и превосходит эту энергию в полупроводнике p -типа на eU_k , обусловленную потенциальной энергией двойного электрического слоя. Для того чтобы дырки могли перейти из слоя p -типа в слой n -типа, они должны обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, высота которого $\Delta W_p = eU_k$.

Потенциальная энергия электронов в слое n -типа равна некоторому постоянному значению, а при приближении к p - n переходу начинает расти. В полупроводнике p -типа эта энергия максимальна и превосходит энергию электронов области полупроводника n -типа на eU_k . Для перехода электронов из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа необходимо преодолеть потенциальный барьер, высота которого $\Delta W_n = eU_k$ обусловлена потенциальной энергией поля. При переходе неосновных носителей заряда (дырок в области n -типа и электронов в области p -типа) из одной области в другую происходит не преодоление потенциального барьера, а как бы «скатывание» с него.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Терморезистивный эффект — изменение электрического сопротивления проводника или полупроводника, обусловленное исключительно действием его нагревания. При температурах выше температуры Дебая сопротивление чистых металлов определяется, как правило, фоновым механизмом рассеяния и увеличивается линейно с повышением температуры, поскольку возрастает рассеяние электронных волн на тепловых колебаниях кристаллической решетки, что означает уменьшение среднего свободного пробега λ электронов. При обычной температуре значение λ обратно пропорционально первой степени температуры, что приводит к прямой пропорциональности удельного электрического сопротивления $\rho = m\lambda/ne^2\lambda$ температуре. Скорость u и концентрация n в металле практически не зависят от температуры. Дифференциальный температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС)

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

для большинства чистых металлов положителен. У кобальта при 0°C он равен $6,58 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, у α -марганца $0,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Ряд сплавов имеет весьма низкий или даже отрицательный ТКС, обусловленный взаимодействием электронов с примесными атомами и другими дефектами кристаллической решетки. У марганца при 0°C $\alpha = 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, при 40°C $\alpha \approx 0$, при 150°C минимальное значение $\alpha = -15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

В металлах количество носителей заряда и их энергия практически не зависят от температуры. В полупроводниках количество носителей заряда значительно меньше, чем в металлах, однако их концентрация и энергия весьма сильно зависят от температуры. С ее повышением количество свободных электронов и дырок резко возрастает. Подвижность носителей заряда также изменяется с температурой. Например, подвижность носителей заряда, обусловленная рассеянием электронов тепловыми колебаниями решетки, $\mu \sim T^{-q}$, где в монокристаллических полупроводниках показатель степени q лежит в пределах от 1 до 3. Окисные полупроводниковые материалы обладают отрицательным ТКС. Монокристаллические полупроводни-

ковые материалы позволяют получать как отрицательные, так и положительные ТКС. В терморезисторе типа СТ1-21 при 20°C $\alpha = (3,25 \div 5,75) \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Ферриты в немагнитном состоянии имеют температурные характеристики до точки Кюри, аналогичные по форме таким же характеристикам полупроводников. В немагнитных ферритовых термисторах $\alpha = (3 \div 20) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Особенностью температурных характеристик $\rho = f(T)$ ферритов является наличие изломов. В ферритах некоторых видов изломы располагаются вблизи точки Кюри, что обусловлено магнитными превращениями. Характеристики других ферритов имеют в области температур до точки Кюри резкие изломы, обусловленные переходом от примесной к собственной проводимости. Благодаря этому в области высоких положительных температур резко возрастает ТКС. Например, для некоторых ферритных терморезисторов при температуре 500°C ТКС может составлять 2—3%, тогда как для многих полупроводниковых терморезисторов он имеет такое значение лишь при температурах не выше 20°C .

Особенностью терморезистивного эффекта в намагнитном феррите является частотная зависимость электрического сопротивления. Вблизи частоты ферромагнитного резонанса электрическое сопротивление резко уменьшается и приобретает невязанный характер для прямых и обратных волн в волноводах.

Электротермический эффект Томсона заключается в выделении или поглощении теплоты

$$Q_S = S(T_2 - T_1)It$$

при токе I за время t в однородном проводнике, в котором имеется перепад температур $T_2 - T_1$. Коэффициент Томсона S зависит от природы материала.

Если вдоль проводника с током существует градиент температуры, причем направление тока соответствует движению электронов от горячего конца к холодному и коэффициент S положителен, то при переходе из более нагретого участка в более холодный электроны тормозятся и передают избыточную энергию окружающим атомам (выделяется теплота). При обратном направлении тока электроны, переходя из более холодного участка в более горячий, ускоряются и пополняют свою энергию за счет энергии окружающих атомов (теплота поглощается).

Термоэлектродный эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлов или полупроводников, места соединения которых находятся при разных температурах (T_1 и T_2), возникают электрический ток (термоэлектрический) и ЭДС E_{12} , называемая термоЭДС. В небольшом интервале температуры $E_{12} = e_{12}(T_1 - T_2)$, где коэффициент термоЭДС

$$e_{12} = \int_0^T \frac{S_1}{T} dT - \int_0^T \frac{S_2}{T} dT = e_1 - e_2,$$

причем S_1 и S_2 — коэффициенты Томсона пары соединенных материалов, e_1 и e_2 — абсолютные

коэффициенты термоЭДС этих материалов. ТермоЭДС положительна, если ток в нагретом спае направлен из материала 2 в материал 1. Абсолютные коэффициенты термоЭДС при 20°C для свинца, меди и платины равны соответственно $-1,26$; $+1,86$; $-5,13$ мВ/К. По отношению к этим металлам в таблицах обычно приводятся термоЭДС других материалов. Коэффициент термоЭДС термоэлемента, образованного веществами m и n , $e_{mn} = e_{mk} + e_{kn} = e_{mk} - e_{nk}$.

Знаки коэффициентов e и полярности термоэлектродов определяются из условия: в холодном спае ток направлен от положительного термоэлектроды к отрицательному. Коэффициент термоЭДС пары материалов связан с их коэффициентами Томсона соотношением

$$\frac{de_{12}}{dT} = \frac{S_1 - S_2}{T}.$$

Термоэлектродный эффект при нагреве спаев двух электродов с электронной электропроводимостью объясняется диффузией «горячих» электронов в сторону холодного спаев с меньшей концентрацией «холодных» электронов. Эти явления наиболее слабо выражены у типичных металлов и наиболее сильно — у полупроводников. Стационарное значение термоЭДС устанавливается после того, как диффузионный ток уравнивается обратным потоком электронов под влиянием возникающего электрического поля. При этом устанавливается избыточная концентрация электронов вблизи холодного спаев. ТермоЭДС появляется в результате неравенства разностей потенциалов в двух разнородных электродах.

Аналогично протекают процессы переноса дырок. В дырочных полупроводниках холодный спай приобретает положительный потенциал по отношению к горячему. Очевидно, что наибольшую термоЭДС можно получить при комбинировании термоэлектродов из электронного и дырочного полупроводников. Эта термоЭДС достигает 1 мВ/К, что в десятки и сотни раз больше, чем в металлах. Коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов достигает 10%.

Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении теплоты в месте соединения двух разнородных проводников при наличии тока I . Это количество теплоты $Q_P = \Pi It$ пропорционально прошедшему через контакт заряду It и коэффициенту Пельтье $\Pi = eT$ (e — коэффициент термоЭДС).

Эффект Пельтье объясняется различием средней энергии носителей заряда в двух контактирующих проводниках. Когда носители заряда, переносимые током через контакт, переходят из вещества с большей энергией носителей заряда в вещество с меньшей энергией носителей заряда, энергия их уменьшается путем передачи ее избытка кристаллической решетке. Этот избыток энергии и выделяется в виде теплоты Пельтье. Применяя контакт полупроводников с высокой термоЭДС, можно создать на его основе достаточно экономичную холодильную установку.

Термогальваномагнитный эффект заключается в возникновении поперечной напряженности

электрического поля в проводнике вследствие продольного градиента температуры и поперечного магнитного поля. Это явление иногда называют эффектом Нернста — Эттингсхаузена.

Поперечным термогальваномагнитным эффектом (эффектом Эттингсхаузена) называют явление, при котором возникает поперечный градиент температуры в полупроводнике с током вследствие разброса скоростей носителей заряда в поперечном магнитном поле.

Продольным термогальваномагнитным эффектом (эффектом Нернста) называют возникновение продольного градиента температуры в полупроводнике с током вследствие разброса скоростей носителей зарядов в поперечном магнитном поле.

Термомагнитным эффектом (эффектом Рееги — Ледюка) называется возникновение поперечного градиента температуры в полупроводнике при наличии продольного градиента температуры в поперечном магнитном поле.

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Гальваномагнитными называют явления, связанные с воздействием магнитного поля на электрические свойства проводников и полупроводников с электрическим током. Техническое применение получили три гальваномагнитных явления: эффект Холла, магниторезистивный и магнитодиодный эффекты. Первые два обусловлены действием магнитного поля на равновесные носители заряда, а последний — на неравновесные носители заряда (в полупроводнике).

Эффект Холла проявляется в возникновении электрического поля с напряженностью $E = R \mathbf{j} \times \mathbf{B}$, перпендикулярной векторам магнитной индукции $\mathbf{B}$ и плотности тока $\mathbf{j}$. Коэффициент (или постоянная) Холла R может иметь положительное и отрицательное значения и изменять знак с изменением температуры. Эффект Холла является следствием того, что на носитель заряда (электрон и дырку), перемещающийся в магнитном поле, действует сила, пропорциональная векторному произведению скорости носителя заряда на магнитную индукцию. Под влиянием этой силы движущиеся в направлении электрического поля, созданного в образце внешними источниками напряжения, носители заряда отклоняются в поперечном направлении.

В ферромагнетиках на электроны кроме внешнего магнитного поля с напряженностью H действует магнитное поле доменов, определяющееся намагнитченностью M образца. При этом наблюдается особый, ферромагнитный, эффект Холла. Напряженность поперечного электрического поля (в направлении оси y)

$$E = (R_0 H + R_s M) j_x,$$

где j_x — плотность тока (в направлении оси x); R_0 — обыкновенный коэффициент Холла; R_s — так называемый спонтанный, или ферромагнитный, коэффициент Холла. С повышением температуры коэффициент R_s возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается.

Для большинства неферромагнитных материалов коэффициенты Холла почти не зависят от

Т а б л и ц а 2.1. Коэффициент Холла для металлов (вблизи комнатной температуры)

Металл	$R, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	Металл	$R, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$
Na	-2,1	W	+1,18
Mg	-0,83	Pt	-1,27
K	+4,2	Au	-0,705
Cu	-0,536	Hg	-0,76
Mo	+1,80	As	+45,2
Sn	-0,022		

температуры. Гальваномагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. Поэтому приведенные в табл. 2.1 значения коэффициента Холла надо рассматривать лишь как наиболее вероятные.

В полупроводниках дрейфующие в электрическом поле электроны и дырки отклоняются магнитным полем к одной и той же грани образца. У этой грани происходит их накопление до тех пор, пока созданное ими поле Холла и возникающий градиент концентрации носителей заряда не компенсируют силу Лоренца. Знак возникающей ЭДС Холла зависит от типа электропроводности (электрической или дырочной).

В полупроводнике с одним типом электропроводности сила Лоренца полностью компенсируется полем Холла. В итоге на боковых гранях образца возникает разность потенциалов, а носители заряда, движущиеся со средней скоростью дрейфа, не отклоняются под воздействием магнитного поля от направления внешнего электрического поля. В полупроводнике с двумя типами носителей заряда поле Холла меньше и компенсирует силу Лоренца для каждого из типов носителей заряда не полностью, поэтому их движение отклоняется от направления напряженности внешнего электрического поля. Для характеристики этого эффекта помимо коэффициента Холла используются «холловская подвижность» $\mu_H = |R\gamma|$ и «угол Холла», на который отклонились бы носители заряда в данном магнитном поле при отсутствии поля Холла, $\theta \approx \mu_B$ (μ — обычная подвижность носителя заряда и γ — удельная электрическая проводимость.)

Магниторезистивный эффект, называемый также эффектом Гаусса, заключается в изменении электрического сопротивления под воздействием магнитного поля. Он обусловлен изменением пути, проходимого носителями заряда между актами рассеяния, при наличии магнитного поля. Дело в том, что даже при наличии поля Холла и в примесном полупроводнике вследствие теплового движения всегда есть носители заряда, движущиеся со скоростями, как большими, так и меньшими средней скорости дрейфа во внешнем электрическом поле. Таким образом, направление движения практически всех носителей заряда в магнитном поле не совпадает с направлением внешнего электрического поля. Магниторезистивный эффект считается положительным, если при воздействии магнитного поля сопротивление материала возрастает. Отрицательный эффект (уменьшение сопротивления материала) обычно наблюдается при

низких температурах и пока не используется для создания гальваномагнитных приборов. У большинства полупроводников и металлов (за исключением ферромагнитных) сопротивление с ростом напряженности магнитного поля возрастает.

При обычно используемых магнитных индукциях $B \ll 10$ Тл и комнатной температуре «магнитосопротивление» $\Delta\rho/\rho_0$ ($\Delta\rho$ — изменение электрического сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — электрическое сопротивление при $B = 0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho_0 = 10^{-4}$ при $B = 2$ Тл. Исключением является висмут, у которого $\Delta\rho/\rho_0 = 2$ при $B = 3,1$ Тл. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах. Например, в германии при 100 К и $B = 2$ Тл $\Delta\rho/\rho_0 = 3$.

Зависимость магнитосопротивления от магнитной индукции в полупроводниках близка к квадратичной. Это сопротивление тем больше, чем больше подвижность носителей заряда.

Магниторезистивный эффект зависит от угла между направлениями векторов магнитной индукции и плотности тока. Максимальный эффект наблюдается, когда эти направления ортогональны, а минимальный — при совпадении этих направлений.

Магнитодиодным эффектом называется явление резкого возрастания электрического сопротивления диода в прямом направлении под воздействием поперечного магнитного поля.

Наиболее отчетливо этот эффект проявляется при несимметричном p - n переходе и широкой базе, т.е. когда концентрация равновесных носителей заряда, например, в p -области много больше, чем в n -области, и расстояние между p - n -переходом и контактом значительно превышает длину диффузионного смещения носителя заряда до рекомбинации. Тогда прямой ток очень сильно зависит от отношения толщины базовой области d к диффузионной длине L и практически все напряжение при прямом смещении приходится на базу, а напряжение на p - n переходе составляет малую его долю.

Резкое возрастание сопротивления такого диода после появления поперечного магнитного поля обусловлено совместным действием трех явлений. Во-первых, уменьшается подвижность носителей заряда. Влияние магнитного поля особенно значительно на неосновные носители заряда благодаря тому, что поле Холла, созданное основными носителями, усиливает искривление траектории дрейфа неосновных носителей заряда. Во-вторых, уменьшается их диффузионная длина (средний путь диффундирующего носителя заряда за среднее время жизни). В-третьих, уменьшается инжекция дырок из p - n перехода вследствие увеличения сопротивления базы и дальнейшего уменьшения напряжения на p - n переходе.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Магнитооптическими называют явления, в которых проявляется влияние магнитного поля на излучение и распространение света. К ним, в

частности, относятся эффекты Фарадея, Коттона—Мутона, Керра и циклотронный резонанс.

Эффектом Фарадея называется поворот плоскости поляризации света, прошедшего сквозь среду, находящуюся в продольном внешнем магнитном поле. Поворот плоскости поляризации возникает вследствие различия фазовых скоростей циркулярно поляризованных волн с правым и левым вращением, на которые распадается линейно поляризованная волна в гиротропной среде. В общем случае угол поворота плоскости поляризации на единицу длины пути волны:

$$F = \frac{\pi}{\lambda} (n'_+ - n'_-),$$

где λ — длина волны; n'_+ и n'_- — действительные компоненты показателей преломления для право- и левополяризованных волн.

В ферромагнитных материалах для света, распространяющегося вдоль направления намагниченности насыщения M_s , угол вращения плоскости поляризации:

$$F = K M_s,$$

где K — постоянная Кундта; F — угол (считается положительным, если при распространении света вдоль направления магнитного поля плоскость поляризации вращается по часовой стрелке).

Добротность, или «качество», магнитооптических сред оценивается отношением $2F/\alpha$, где α — коэффициент поглощения. Параметры некоторых ферромагнитных материалов при температуре 300 К приведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2. Магнитооптические свойства веществ

Вещество	M_s , кА/м	λ , нм	F , °С/м	α , м ⁻¹	$2F/\alpha$
Fe	1730	546	$3,5 \cdot 10^7$	$7,6 \cdot 10^7$	0,92
Co	1444	546	$3,6 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^7$	0,85
Ni	508	546	$0,99 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^7$	0,25
Пермаллой Ni : Fe (82:18 %)	848	500	$1,22 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$	0,4
MnBi	611	450	$4,2 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^7$	1,4
YIG	198	1200	$2,5 \cdot 10^4$	6,9	7000

Эффект Фарадея в полупроводниках обусловлен поляризацией как связанных, так и свободных электронов.

Эффектом Коттона — Мутона (или Фохта) называют двойное лучепреломление света, распространяющегося перпендикулярно направлению магнитного поля. При этом линейно поляризованная волна преобразуется в общем случае в эллиптически поляризованную волну. Эффект возникает вследствие различия фазовых скоростей обыкновенной и необыкновенной волн, на которые распадается линейно поляризованная волна в поперечно-намагниченной среде.

Магнитооптический эффект Керра проявляется во влиянии намагниченности ферромагнитного

материала на поляризацию отраженного от его поверхности света. Как и эффект Фарадея, он обусловлен различием показателей преломления намагниченной среды для право- и левополяризованных волн. В зависимости от взаимной ориентации плоскости падения света и намагниченности различают три разновидности магнитооптического эффекта Керра. Полярный эффект возникает, когда вектор намагниченности перпендикулярен отражающей поверхности; в меридиональном (продольном) эффекте вектор намагниченности параллелен как отражающей поверхности, так и плоскости падения света; при экваториальном (поперечном) эффекте вектор намагниченности параллелен отражающей поверхности, но перпендикулярен плоскости падения света.

Циклотронным эффектом называют тенденцию носителей заряда закручиваться в спираль вокруг направления вектора напряженности магнитного поля с угловой частотой $\omega_c = eB/m$, называемой циклотронной, при которой поглощение света достигает максимума, а ширина резонансной кривой равна частоте соударений $\nu = 1/\theta$, т. е. позволяет определить время свободного пробега θ .

ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Внутренним фотоэффектом называют явление, происходящее внутри твердого тела при его взаимодействии со световым потоком и приводящее к перераспределению электронов по энергетическим уровням и изменению электрических свойств освещаемого образца — его электрической проводимости и внутреннего электрического поля. В отличие от внешнего фотоэффекта, заключающегося в эмиссии электронов, при внутреннем фотоэффекте происходит изменение только энергетического состояния электронов, приводящее к изменению концентрации свободных носителей заряда, а также к перераспределению их внутри тела. Внутренний фотоэффект характерен только для полупроводников и диэлектриков, тогда как внешний фотоэффект наблюдается и при освещении проводников.

При внутреннем фотоэффекте первичным процессом является световая инжекция (оптическая генерация) избыточных носителей заряда. Образование неравновесных носителей заряда здесь происходит при поглощении энергии фотонов. Этот процесс зависит как от внешних факторов (освещенности и длины световой волны), так и от внутренних (геометрической формы, коэффициентов поглощения, диффузии и рекомбинации).

В зависимости от условий внутренний фотоэффект может приводить к вторичным явлениям самого различного характера. Так, в отсутствие внешних электрического и магнитного полей неравномерное освещение однородного полупроводника приводит к возникновению электрического поля, связанного с кристалл-фотоэффектом. Если на пластинку полупроводника падает свет, то между освещенной и параллельной ей неосвещенной поверхностями возникает фотоЭДС. Появление фотоЭДС может быть связано со значительным диффузионным током избыточных носителей заря-

да, вызывающим падение напряжения на образце. Однако фотоЭДС возникает и в тонкой пластинке, когда диффузией можно пренебречь. При этом фотоЭДС будет обусловлена разностью между квазиуровнями Ферми на освещенной и неосвещенной поверхностях пластины. Возникновение разности потенциалов между освещенной и затемненной частями однородного полупроводника может происходить и в результате биполярной диффузии носителей заряда с разной подвижностью. Фотодиффузионную разность потенциалов иногда называют ЭДС Дембера.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта в электрическом поле обнаруживается фоторезистивный эффект. Он заключается в изменении электрической проводимости полупроводника под действием освещения. Изменение электрической проводимости происходит в результате появления неравновесных носителей заряда (Δp , Δn), возникающих при поглощении фотонов. При этом прирост удельной электрической проводимости составляет $\Delta \gamma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$.

При наблюдении внутреннего фотоэффекта в магнитном поле обнаруживается фотомангнетический эффект (эффект Кикоина — Носкова). Он заключается в возникновении электрического поля, направленного перпендикулярно световому потоку и вектору напряженности магнитного поля в полупроводнике. Это электрическое поле образуется в результате отклонения магнитным полем диффузионного тока фотоэлектронов и фотодырок, образующихся вблизи освещенной поверхности. Поэтому фотомангнетический эффект можно рассматривать как эффект Холла на фотодиффузионном токе. Прямая пропорциональность фотоЭДС освещенности и магнитной индукции (при небольших освещенностях и напряженностях магнитного поля) дает возможность создать на основе фотомангнетического эффекта приемники инфракрасного излучения и магнитометры.

При освещении электронно-дырочного перехода обнаруживается фотогальванический эффект. Он проявляется в возникновении ЭДС или тока в результате разделения носителей заряда (генерируемых в полупроводнике под действием внутреннего фотоэффекта) электрическим полем, обусловленным неоднородностью полупроводника. Возникающая при этом фотоЭДС является причиной появления напряжения на фотодиодах и фототранзисторах.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Люминесценцией называют явление поглощения веществом энергии с последующим электромагнитным излучением в видимой области спектра или близкой к ней. Точнее, люминесценцию определяют как излучение, избыточное над тепловым излучением тела в данной спектральной области, если оно обладает длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. В зависимости от способов возбуждения люминесценции различают: фотолюминесценцию (за счет поглощения энергии света), электролюминесценцию (при

поглощении электрической энергии), катодолюминесценцию (при бомбардировке электронами), рентгенолюминесценцию (от гамма-лучей), триболюминесценцию (при механическом воздействии), хеми- и биолюминесценцию (при химических и биологических процессах). Если люминесценция происходит только во время возбуждения, то ее называют *флюоресценцией*; если она продолжается некоторое время после окончания возбуждения — *фосфоресценцией*.

Различие между перечисленными видами люминесценции связано с процессом поглощения энергии, а не с тем, как она превращается в световую. Известны два основных механизма люминесцентного излучения. При первом из них излучение фотона происходит при рекомбинации пары электрон — дырка. Подобные процессы происходят, в частности, при инжекции неосновных носителей заряда вблизи *p-n* перехода (в светоизлучающих диодах). Такое излучение наблюдается в кристаллах CdS, SiC, Ge, Si и некоторых других полупроводниковых соединениях. Второй, нерекombинационный, механизм связан с переходом люминесцентного центра из возбужденного состояния в основное. Процессы такого рода наблюдаются в фосфоре и сульфиде цинка.

Электрорлюминесцентные ячейки используются в системах освещения, индикации и обработки информации, в частности в оптоэлектронике. Параметры отечественных люминесцентных материалов (электрорлюминофоров) приведены в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3. Параметры электрорлюминофоров

Марка	Состав	Цвет свечения	Длина волны в максимуме излучения, нм	Яркость свечения, кд/м ²	
				на- чалъ- ная	через 2000 ч
ЭЛ-455С	ZnS - Си	Синий	455	20	6
ЭЛ-455	ZnS - Си	Голубой	455	20	6
ЭЛ-510М	ZnS-Си, Al	Зеленый	510	60	15
ЭЛ-515	ZnS - Си	Зеленый	515	70	18
ЭЛ-580	ZnS-Си, Мп	Желтый	580	20	7

П р и м е ч а н и е. Данные по яркости свечения приведены для электрорлюминесцентных конденсаторов, изготовленных с применением эпоксидного лака ЭП-96, при толщине электрорлюминесцентного слоя 60 мкм, напряжении 220 В и частоте 400 Гц.

2.2. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Сверхпроводимость — свойство проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определенной критической температуры T_k , характерной для данного материала. Для некоторых элементов при нормальном давлении значения критической температуры приведены в табл. 2.4, а

для некоторых сплавов и химических соединений — в табл. 2.5.

Критическая температура зависит от давления и внешнего магнитного поля, технологии изготовления образцов (в пленках она иная), структуры кристаллов и сплавов. Сверхпроводимость отсутствует в чистых металлах, имеющих атомный магнитный порядок, т. е. переходных металлах с незастроенными *d*- и *f*-оболочками (Co, Fe, Ni, Cd и др.), — атомный магнетизм и сверхпроводимость являются исключаяющими друг друга явлениями. Сравнительно мало пока обнаружено сверхпроводников среди щелочных, щелочно-земельных, бла-

Т а б л и ц а 2.4. Температура сверхпроводящего перехода и критическая магнитная индукция для чистых элементов

Элемент	T_k , К	B_0 , Тл
Алюминий	1,19	0,0099
Ванадий	5,3	0,1370
Вольфрам	0,012	0,1070
Галлий	1,09	0,0051
Индий	3,40	0,0293
Иридий	0,14	0,0020
Кадмий	0,55	0,0030
Ниобий	9,2	0,1944
Осмий	0,65	0,0065
Олово-α	3,72	0,0309
Рений	1,7	0,0198
Рутений	0,5	0,0066
Свинец	7,2	0,0803
Тантал	4,39	0,0830
Торий	1,37	0,0162
Титан	0,39	0,0100
Таллий	2,39	0,0171
Цинк	0,9	0,0053
Цирконий	0,55	0,0047

Т а б л и ц а 2.5. Критическая температура сплавов и химических соединений

Соединение	T_k , К	Соединение	T_k , К
Nb _{0,75} Zr _{0,25}	11,0	Li _{0,1-0,3} × ×Ti _{1,1} S ₂	10 — 13
Nb _{0,75} Ti _{0,25}	10,0	Pb _{0,92} Mo _{0,08} S ₇	15,2
Nb ₃ Sn	18,3	Li Ti ₂ O ₄	13,7
Nb ₃ Ge	23,2	Mo, N	13 — 14,8
(Hf _{0,5} Zr _{0,5})V ₂	10,1	B ₅ Mo _{1,69} × ×Zr _{0,31}	11,2
NbTe ₃	10,5	Sn Te	0,02 — 1,1
Mo _{0,38} Re _{0,62}	14,6	Ge Te	0,06 — 0,41
RhZr ₂	11,1	Cr Ti O ₃	0,03 — 0,35
NbRu ₃	15 — 16	In Te	1,0 — 3,5
RhZr ₃	11,0	Nb Se ₂	7,0
NbN	17,3	Nb S ₂	5,4
(Y _{0,7} Th _{0,3}) × × C _{3,1}	17,0	(SN) _x	0,26

городных металлов, редкоземельных и актиноидов. Высокие температуры сверхпроводящего перехода могут быть у таких химических соединений, компоненты которых имеют низкие T_K или вообще не являются сверхпроводниками. Например, у азота и углерода сверхпроводимость отсутствует, у чистых вольфрама, циркония и молибдена $T_K < 1$ К, а у WC $T_K = 10$ К, у ZrN $T_K = 10,7$ К у MoC $T_K = 14,3$ К. Открытие сверхпроводимости в полимере (SN)_x означает начало нового этапа изучения сверхпроводимости. Наиболее высокими сверхпроводящими параметрами обладают сплавы и соединения на основе переходных металлов.

В последние годы открыты сверхпроводники с критической температурой, превышающей «азотную» (77 К). Они получили название высокотемпературных сверхпроводников и образуют три группы керамических материалов. К первой относятся редкоземельные материалы типа $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где в качестве R кроме иттрия выступают редкоземельные элементы иттриевой группы: Nd, La, Sm, Eu, Cd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. При $x \leq 0,2$ значения критической температуры этой группы материалов лежат в диапазоне 85—95 К. Ко второй группе относятся висмутовые соединения, в частности $\text{Bi}_2\text{CaCr}_2\text{Cu}_2\text{O}_8$ ($T_K \approx 80 \div 85$ К) и $\text{BiCa}_2\text{Cr}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ ($T_K \approx 110 \div 115$ К). Третью группу образуют таллиевые соединения $\text{TlCaBaCu}_2\text{O}_{5,5+x}$, $\text{Tl}_2\text{CaBa}_2\text{Cu}_2\text{O}_{8+x}$, $\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$, имеющие критические температуры 120, 125 и 106—108 К соответственно.

В магнитном поле вещество становится сверхпроводящим при критической температуре T_K более низкой, чем T_K :

$$B_K = B_0 (1 - T^2 / T_K^2),$$

где B_0 — критическая магнитная индукция при нулевой температуре; B_K — магнитная индукция, при которой происходит переход из сверхпроводящего состояния в нормальное при температуре $T < T_K$.

Значения B_0 приведены в табл. 2.4. Более тонкая проволока сверхпроводника обладает более высокой критической магнитной индукцией. Некоторые сплавы, например ниобий — олово, имеют волокнистую структуру, вследствие чего и в больших образцах материала критическая магнитная индукция высока.

Сверхпроводимость объясняется взаимодействием электрона с решеткой кристалла, при котором возникает межэлектронное притяжение. Оно связано с характером деформации (поляризации) кристаллической решетки электрическим полем движущегося электрона. Как известно из квантовой механики, кристаллическая решетка при температуре $T = 0$ К совершает «нулевые» колебания, соответствующие основному состоянию ($n = 0$) гармонического осциллятора. Электрон, движущийся в кристалле, нарушает режим этих колебаний и переводит решетку в возбужденное состояние. Обратный переход ее сопровождается излучением энергии, которая поглощается другим электроном. Этот процесс может быть рассмотрен как излучение фонона электроном, движущимся в решетке, с последующим поглощением фонона другим электроном.

Обмен виртуальными фононами согласно квантовомеханической теории и создает дополнительное притяжение между электронами. Если это притяжение превысит при низких температурах кулоновское отталкивание электронов, возникнет сверхпроводимость. При этом электронная система превращается в связанный коллектив, для возбуждения которого требуется затрата конечной энергии. Возбужденное состояние отделено от основного некоторым энергетическим интервалом, называемым «энергетической щелью» Δ .

Притяжение между электронами будет наиболее сильным, если они обладают противоположными импульсами и спинами. Поэтому электронную систему в сверхпроводнике можно представить состоящей из связанных пар таких электронов, а возбуждение электронной системы — как разрыв такой пары. Электронные пары называют часто куперовскими по имени Купера, показавшего, что основное состояние нормального металла является неустойчивым относительно сколь угодно слабого притяжения между электронами на поверхности Ферми, в результате чего в такой системе электронам энергетически выгодно разбиться на связанные пары с нулевыми суммарными импульсом и спином. Энергетическая щель Δ является мерой связи между электронами пары. Ее размеры составляют около 10 мкм, т.е. примерно в 10^4 раз больше периода решетки (около 0,1 нм).

Сверхпроводимость обусловлена взаимодействием электронов с фононами. Энергия фонона $\hbar\omega$ не может быть сколь угодно большой, так как длина соответствующей акустической волны ограничена в кристалле снизу размером, приблизительно равным периоду решетки. Максимальная энергия фонона соответствует в температурной шкале дебаевской температуре T_D . Поэтому переходить в связанное состояние в сверхпроводнике могут лишь электроны, расположенные вблизи уровня Ферми ($W_F \approx 10^4$ К) в слое толщиной $\hbar\omega \approx 10^2$ К. Из этого следует, что температура сверхпроводящего перехода не может превосходить температуры Дебая, хотя благодаря межэлектронному притяжению T_K оказывается приблизительно на порядок меньше T_D . Для многих элементов хорошо подтверждается экспериментальное соотношение для энергетической щели при нулевой температуре $\Delta(0) = 1,76k T_K$, где k — постоянная Больцмана.

При температуре, отличной от абсолютного нуля, хаотическое тепловое движение приводит к возбуждению электронной системы и ослабляет притяжение между электронами. Поэтому энергетическая щель при данной температуре $\Delta(T) \approx \Delta(0) \sqrt{1 - T/T_K}$.

Электрическое сопротивление обусловлено диссипативным взаимодействием движущейся электронной системы (тока) с кристаллической решеткой или примесями. При наличии щели в энергетическом спектре квантовые переходы электронной системы не всегда возможны. При малых скоростях своего движения электронная система не возбуждается, что и означает движение «без трения», т.е.

отсутствие электрического сопротивления ($\rho = 0$). Сверхпроводимость исчезает, если плотность тока превышает некоторое критическое значение.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Одно из наиболее фундаментальных свойств сверхпроводников заключается в том, что магнитное поле не проникает в их толщу (эффект Мейснера). Это соответствует нулевой относительной магнитной проницаемости ($\mu = 0$) и идеальному диамагнетизму ($\chi = -1$). Нулевое значение магнитной индукции в толще сверхпроводящего образца является результатом того, что во внешнем магнитном поле на его поверхности возникает стационарный электрический ток, собственное магнитное поле которого противоположно внешнему магнитному полю и полностью его компенсирует внутри образца. Поверхностный слой сверхпроводника (обычно несколько десятков нанометров) обладает особыми свойствами, связанными с отличной от нуля напряженностью магнитного поля и экранирующими незатухающими токами.

Существенная особенность электродинамики сверхпроводников заключена в нелокальном характере связи плотности тока с напряженностью внешнего магнитного поля. Это обусловлено тем, что электроны в сверхпроводнике пространственно связаны, коррелированы друг с другом. Если магнитное поле изменяет состояние одного электрона, то это благодаря межэлектронному взаимодействию влияет на поведение другого электрона. Вследствие нелокального характера электродинамики сверхпроводящего состояния ток в какой-либо точке не зависит от напряженности магнитного поля в этой точке, а определяется в общем случае магнитным полем в ее окрестности, т.е. связь между током и магнитным полем носит интегральный характер.

Связь между током и напряженностью магнитного поля становится локальной, если напряженность магнитного поля изменяется медленно, например когда глубина проникновения поля δ в сверхпроводник (поверхностный слой) велика по сравнению с размером куперовской пары ξ_0 . В этом случае плотность тока $\mathbf{J} = \alpha \mathbf{A}$ где $\mathbf{A}$ — векторный потенциал, определяемый из соотношения $\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}$. Тогда из уравнения Максвелла $\mathbf{J} = \text{rot } \mathbf{H}$ зависимость напряженности магнитного поля от координат будет описываться дифференциальным уравнением $\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{\lambda^2} \mathbf{H} = 0$, решение которого для плоской границы сверхпроводника и вакуума дает экспоненциальный закон изменения напряженности магнитного поля в поверхностном слое $H(x) = H(0)e^{-x/\lambda}$, где λ — глубина проникновения. Она близка к $5 \cdot 10^{-6}$ см.

Возбужденный в сверхпроводящем кольце ток становится незатухающим. Это является следствием не только отсутствия сопротивления (и тепловых потерь), но и квантовой природы явления, когда при определенных значениях тока исчезает

излучение и орбиты электронов становятся устойчивыми. Из правила квантования Бора — Зоммерфельда для куперовской пары, движущейся в сверхпроводнике, следует, что связанный с ней магнитный поток оказывается квантованным. Квант магнитного потока или «флюксонид» $\Phi_0 = h / 2e = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб.

Сверхпроводники с одной определенной температурой перехода в сверхпроводящее состояние называют *сверхпроводниками 1-го рода*. У них глубина поверхностного слоя меньше размера куперовской пары ($\delta < \xi_0$). К этой группе относятся все чистые сверхпроводящие металлы, за исключением Nb. Они обладают низкими значениями критической магнитной индукции B_k , выше которых сверхпроводимость разрушается. Это препятствует их использованию в качестве соленоидов для создания сверхсильных магнитных полей.

Ко второй группе относятся *сверхпроводники 2-го рода*, которые находятся в сверхпроводящем состоянии в интервале температур между нижним и верхним критическими значениями. У них глубина проникновения магнитного поля больше корреляционной длины ($\delta > \xi_0$). Чистый металл можно превратить в вещество *второй группы* путем введения точечных примесей или использования в виде тонких пленок. Здесь соударения электронов с примесями или границами пленок нарушают связь, образующую куперовскую пару, и уменьшают корреляционную длину $\xi < \xi_0$, поскольку $\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + l^{-1}$ (l — длина свободного пробега электрона). Своеобразие магнитных свойств сверхпроводников 2-го рода приводит к тому, что в них существуют два значения критической магнитной индукции.

Если магнитная индукция во внешнем магнитном поле начинает превосходить значение нижней критической магнитной индукции, происходит частичное проникновение магнитного поля в толщу сверхпроводящего образца. При этом под воздействием силы Лоренца электроны в сверхпроводнике двигаются по окружностям, образуя вихри («абрикосовские вихри»). Внутри вихря скорость электрона возрастает по мере приближения к оси вихря, пока не достигнет критического значения и не произойдет «срыв» сверхпроводимости. После этого сверхпроводящий образец оказывается пронизанным нитями из обычных, несверхпроводящих областей, ориентированных в направлении линий магнитного поля. Магнитный поток, пронизывающий сечение вихря, один и тот же для всех вихрей и равен кванту магнитного потока. В виде таких отдельных порций магнитное поле проникает внутрь сверхпроводника. Такое состояние называется «смешанным» или «шубниковской фазой», поскольку Л. В. Шубников еще в конце 30-х годов высказал предположение о существовании сверхпроводимости 2-го рода (теоретический анализ на основе уравнений Гинзбурга — Ландау принадлежит А. А. Абрикосову). Сверхпроводник в «шубниковской фазе» способен выдерживать сильные магнитные поля.

По мере возрастания магнитного поля происходят увеличение и сближение вихревых нитей, пока расстояние между ними не станет равным примерно 10^{-4} см и сверхпроводимость полностью не разрушится. Соответствующая магнитная индукция называется верхней критической магнитной индукцией.

При наличии в образце с «шубниковской фазой» тока поперек магнитного поля (он называется транспортным током) этот ток будет взаимодействовать с магнитным полем, проникшим в область вихревых нитей. Под воздействием силы Лоренца вихри начнут двигаться, что вызовет диссипацию энергии. При движении несверхпроводящей фазы (в области вихря) сквозь кристаллическую решетку будет происходить, в частности, рассеяние электронов тепловыми колебаниями решетки, т. е. обычный механизм электрического сопротивления. Таким образом, появление транспортного тока в сверхпроводнике, находящемся в смешанном состоянии, сопровождается выделением теплоты, что означает нулевое значение критического тока, разрушающего сверхпроводимость.

К последней группе относятся *сверхпроводники 3-го рода*, называемые также жесткими или неидеальными сверхпроводниками 2-го рода в отличие от рассмотренных выше идеальных сверхпроводников 2-го рода. Материалы этой группы содержат крупные неоднородности, возникающие при пластическом деформировании.

Характерной особенностью таких сверхпроводников является явление пиннинга (от слова pinning — закрепление), т. е. притягивание вихревых нитей к неоднородностям и закрепление на них. Благодаря этому слабый транспортный ток не в состоянии оторвать «абрикосовский вихрь» от неоднородностей и вызвать его движение, т. е. тепловые потери. Вихри приходят в движение в том случае, если воздействие силы Лоренца оказывается достаточным для того, чтобы преодолеть пиннинг и оторвать вихрь от неоднородности. Следовательно, после превышения транспортным током соответствующего критического значения и срыва вихрей с неоднородностей выделяется энергия и сверхпроводимость исчезает. Критический ток зависит от масштаба неоднородностей, температуры и уровня внешнего магнитного поля.

Сверхпроводники 3-го рода, сохраняя преимущество сверхпроводников 2-го рода (способность выдерживать сильные магнитные поля), устраняют их основной недостаток — нулевой критический ток. Неоднородности их структуры позволяют выдерживать большие токи. Проволока из соединения ниобия с оловом (Nb_3Sn) позволяет выдерживать ток плотностью выше 10^5 А/см² в полях с индукцией примерно 10 Тл. Верхнее значение критической магнитной индукции соединения $\text{Pb Me}_6\text{O}_8$ достигает 50 Тл (в качестве Me используются атомы Sn, Cu, Ag и др., окруженные восьмью атомами кислорода).

Высокотемпературные керамические сверхпроводники имеют плотность критического тока, колеблющуюся, как правило, от долей до сотен

килоампер на квадратный сантиметр. В монокристаллических пленках иттриевой группы критическая плотность тока около $5 \cdot 10^6$ А/см², для пленок висмутовой группы — около $2 \cdot 10^5$ А/см² и для таллиевой группы — $1,2 \cdot 10^5$ А/см², хотя теоретические значения на два порядка выше.

При переменном токе или при пульсирующих внешнем магнитного поля происходят циклические изменения магнитной индукции внутри сверхпроводника, приводящие к диссипации энергии. При частотах, не превышающих десятка килогерц, потери носят гистерезисный характер, определяемый амплитудным значением, и не зависят от формы тока. Критическая плотность переменного тока на частотах $10 \div 100$ Гц мало зависит от частоты и по порядку значений ее амплитуды соответствует критическим значениям плотности постоянного тока. С дальнейшим повышением частоты критическая плотность переменного тока падает и может стать более чем на два порядка ниже критической плотности постоянного тока.

Одно из важнейших достижений сверхпроводниковой техники — создание сверхсильных магнитных полей, причем в достаточно большой области пространства. Современные сверхпроводящие соленоиды позволяют получать поля с магнитной индукцией приблизительно 20 Тл. Затраты энергии на охлаждение (получение жидкого гелия) при этом могут быть в 1000 раз меньше энергии, требуемой для питания обычного электромагнита.

Применение сверхпроводящих обмоток в трансформаторах и электрических машинах открывает возможность почти полностью устранить в них тепловые потери, сделать их значительно более компактными и увеличить единичные мощности. Это связано с возможностью отказа от применения стали, поскольку создаваемые сверхпроводниками магнитные поля намного превосходят их уровень в стальных ферромагнитных материалах. Компактность и экономия массы особенно существенны при создании магнитных систем космических кораблей, в частности, для защиты их от радиации.

Ведутся инженерные разработки сверхпроводящих кабелей для мощных линий передачи энергии. Использование сверхпроводящего состояния объемного резонатора позволяет поднять его добротность более чем на четыре порядка. На частоте 10^{10} Гц достигнута добротность $4 \cdot 10^8$.

Применение высокотемпературных сверхпроводников таллиевой группы открывает возможность реализации линий передачи сигналов с частотным диапазоном вплоть до 1 ТГц, т. е. обеспечивает почти безыскажающую передачу импульсов пикосекундной длительности.

Эффект механического отталкивания сверхпроводника, окруженного магнитной подушкой, используется для создания опор без трения и электрических вращающихся машин с КПД, равным почти 100%. Принцип «сверхпроводящего подвеса» (левитации) может быть использован как в гироскопах, так и в поездах сверхскоростной железной дороги. Использование нескольких вложенных друг в друга сверхпроводящих цилиндров

можно добиться того, что во внутреннем цилиндре не будет содержаться ни одного кванта магнитного потока, т.е. добиться идеального магнитного экранирования.

Особенно выгодно для этих целей применение высокотемпературных сверхпроводников. Традиционные низкотемпературные сверхпроводники в экранах ранее применялись редко из-за неэкономичности. Однако частичное проникновение внешнего магнитного потока в керамический сверхпроводник позволяет ожидать их применения для защиты устройств только от низкочастотных ($f \leq 1$ кГц) электромагнитных наводок. Получение протяженных монокристаллических сверхпроводящих экранов в настоящее время достаточно сложно.

СЛАБОСВЯЗАННЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Система из двух сверхпроводников, разделенных тонким изолирующим слоем толщиной, меньшей корреляционной длины, называется слабо связанными сверхпроводниками. Сверхпроводящий ток через разделяющий их слой связан с туннелированием куперовских пар. Переход их с поверхности Ферми одного сверхпроводника на поверхность Ферми другого не сопровождается изменением энергии и не требует энергии на разрыв пар, т.е. сверхпроводящий туннельный ток может возникнуть и при равной нулю разности потенциалов между сверхпроводниками. В этом проявляется качественное отличие данного явления от туннелирования через потенциальный барьер между двумя сверхпроводниками нормальных электронов.

Количественный анализ связанных с этим явлений может быть получен путем распространения метода связанных мод на квантовые состояния куперовских пар. При этом учитывают, что скорость изменения волновой функции на одной стороне перехода зависит от мгновенных значений волновых функций по обе стороны перехода:

$$\hbar \partial \Psi_1 / \partial t = W_1 \Psi_1 + K \Psi_2; \quad j \hbar \partial \Psi_2 / \partial t = W_2 \Psi_2 + K \Psi_1, \quad \text{где } K — \text{матричный элемент связи между волновыми функциями системы;}$$

$$\Psi_1 = \sqrt{n_1} e^{j\theta_1} \text{ и } \Psi_2 = \sqrt{n_2} e^{j\theta_2} — \text{волновые функции, описывающие макроскопическое состояние двух когерентных ансамблей связанных (сверхпроводящих) электронных пар с плотностями } n_1 \text{ и } n_2 \text{ и фазы волновых функций); } W_1 \text{ и } W_2 — \text{энергия соответственно первого и второго сверхпроводника.}$$

Учитывая, что напряжение на изолирующей прослойке $u = (W_1 - W_2)/2e$ и разность фаз $\varphi = \theta_2 - \theta_1$, из приведенных выше уравнений при $n_1 = n_2 = n_s$ можно получить

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = -\frac{\partial n_2}{\partial t} = \frac{2K}{\hbar} n_s \sin \varphi \text{ и } \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} u = 2\pi \frac{u}{\Phi_0},$$

где $\Phi_0 = h/2e$ — квант магнитного потока.

При постоянном напряжении $u(t) = U$ из по-

следних уравнений $\varphi = 2\pi U t / \Phi_0 + \varphi_0$ и сверхпроводящий туннельный ток $i_s = 2e \frac{\partial n_1}{\partial t} S = I_m \sin \varphi$ ($\omega t + \varphi_0$), где S — площадь диэлектрической прослойки; $I_m = 4en_s KS/\hbar$; φ_0 — постоянная интегрирования.

Из полученных выражений следует, что действительно постоянный туннельный ток связанных пар $I_s = I_m \sin \varphi_0$ может возникнуть и при отсутствии напряжения на изолирующем барьере ($U = 0$). Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона.

При постоянном напряжении U на контакте в нем возникает переменный ток, частота которого $\omega = 2\pi U / \Phi_0$. Это явление получило название нестационарного эффекта Джозефсона. Благодаря этому явлению туннельный переход может служить источником, генератором электромагнитного излучения с частотой, управляемой в широких пределах напряжением.

Магнитное поле в области контакта влияет на разность фаз волновых функций слабо связанных сверхпроводников, а следовательно, и на ток в контакте. Максимальное значение сверхпроводящего туннельного тока

$$I_{max} = I_m \frac{\sin(\pi \Phi_k / \Phi_0)}{\pi \Phi_k / \Phi_0},$$

где Φ_k — магнитный поток в области контакта.

Влияние внешнего магнитного поля на туннельный ток может быть существенно усилено, если использовать интерференцию волн де Бройля куперовских пар в сверхпроводящем кольце, содержащем два последовательных симметрично расположенных туннельных контакта. Сверхпроводящее кольцо включено в цепь внешнего (управляющего) тока, разделяющегося поровну между двумя туннельными переходами и изменяющего фазы в области сверхпроводящего контакта. Максимальное значение этого тока, при котором еще возможно сверхпроводящее туннелирование, $I_{max} \approx I_0 \cos(\pi \Phi / \Phi_0)$ определяется магнитным потоком Φ , пронизывающим сверхпроводящее кольцо.

Рассмотренное выше устройство получило название сверхпроводящего квантового интерферометра.

Рассмотренные выше явления лежат в основе работы различного вида сверхпроводниковых магнитометров и градиентометров уникальной чувствительности.

Переход к азотным рабочим температурам приводит к резкому снижению затрат на охлаждение, обусловленному меньшей стоимостью жидкого азота по сравнению с жидким гелием, а также его большей удельной теплотой испарения. Правда, при переходе от гелиевых температур к азотным происходит почти 20-кратное увеличение уровня тепловых флуктуаций. Это приводит к возрастанию мощности, рассеиваемой в джозефсоновских переходах, и ограничивает степень интеграции подобных устройств. Необходимое при этом увели-

чение критического тока требует уменьшения индуктивности и размеров сверхпроводящих интерферометров.

Туннельная система сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник представляет собой один из многих типов слабосвязанных сверхпроводников, общим признаком которых является наличие неоднородной сверхпроводящей структуры, содержащей в направлении тока короткую область с подавленной сверхпроводимостью. Например, в точечном контакте и мостике переменной толщины подавление сверхпроводимости происходит в результате превышения локальной плотностью тока своего критического значения. В пленке сверхпроводника с нанесенной на нее узкой полоской нормального металла подавление сверхпроводимости обусловлено эффектом близости.

2.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДЕ

УРАВНЕНИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКИ

При движении проводящей среды в магнитном поле возникает сила Лоренца, обуславливающая соответствующие ЭДС и ток. Их возникновение и взаимодействие с электромагнитным полем относятся к той области явлений, которая получила название магнитогидродинамики. При этом предполагается, что количество заряженных частиц в системе столь велико, что ее поведение допускает макроскопическое описание с помощью таких понятий, как плотность тока, проводимость, плотность массы и т.д. Движение системы носителей заряда при этом можно рассматривать как движение жидкости с определенными электрическими и магнитными свойствами.

Сложная картина взаимодействия электромагнитных и гидродинамических явлений описывается на основе совместного решения уравнений электромагнитного поля и уравнений движения жидкости.

Гидродинамические уравнения включают:

уравнение непрерывности, или сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0;$$

уравнение движения (Навье — Стокса)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = - \operatorname{grad} p + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \\ + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{2}{3} \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{v};$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho w + \frac{\mathbf{E} \mathbf{D}}{2} + \frac{\mathbf{B} \mathbf{H}}{2} \right) + \frac{\mathbf{J}^2}{\gamma} - \mathbf{J} \mathbf{E}_{\text{стор}} = \\ = - \operatorname{div} \left(\mathbf{v} \frac{\rho v^2}{2} + \mathbf{v} \rho w + \mathbf{v} \rho - \sigma'_{ik} - \alpha \nabla T + \mathbf{E} \times \mathbf{H} \right),$$

где v — скорость; ρ — плотность вещества; p — давление; η и ζ — первый и второй коэффициенты вязкости; α — коэффициент теплопроводности; w — внутренняя энергия единицы массы; σ'_{ik} — тензор вязких напряжений:

$$\sigma'_{ik} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l};$$

$\mathbf{D}$ — смещение.

Электродинамические уравнения используют в виде

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0;$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \operatorname{rot} \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{\gamma \mu_0} \nabla^2 \mathbf{B},$$

где γ — удельная электрическая проводимость.

Последнее уравнение есть результат исключения из уравнений Максвелла напряженности электрического поля в движущейся среде, где плотность тока $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}' = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$.

При этом предполагается, что относительная магнитная проницаемость среды мало отличается от единицы, а электрическая проводимость постоянна — не зависит ни от времени, ни от координат, ни от магнитного поля (это не соблюдается в слишком разреженной среде и сильном магнитном поле).

«ВМОРОЖЕННОСТЬ» И «ДИФФУЗИЯ» МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Наглядная интерпретация может быть дана второму электродинамическому уравнению в предельном случае достаточно больших проводимостей, когда

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \operatorname{rot} \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

Это означает, что при перемещении какого-либо замкнутого «жидкого контура» в идеально проводящей среде он не будет пересекать магнитных линий. Действительно, изменение во времени магнитного потока, который пронизывает контур, перемещающийся с окружающей средой, определяется изменением магнитной индукции во времени и пересечением этим контуром магнитных линий:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} + \int \mathbf{B} \times \mathbf{v} d\mathbf{l} = \\ = \int \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \operatorname{rot} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) d\mathbf{S} = 0.$$

То, что магнитный поток через всякую поверхность, опирающуюся на «жидкий контур», остается неизменным, означает, что магнитные линии как бы «приклеены» или «вморожены» в вещество и перемещаются вместе с ним.

Условие «вмороженности» означает, что при движении среды поперек магнитного поля в ней индуцируются токи, поле которых, складываясь с первоначальным, так изменяет его, что магнитные линии смещаются вслед за средой. Поэтому движение среды вдоль магнитных линий не вызывает ЭДС.

«Вмороженность» приводит к тому, что поле усиливается при сжатии проводящей среды и ослабляется при ее расширении. Усиление и расширение поля не связаны с увеличением магнитного потока, поэтому они происходят почти безынерционно и не имеют ничего общего с изменениями поля под действием сторонних источ-

ников тока. Сохранение магнитного потока может объяснить происхождение магнитного поля звезд после сжатия газа со слабым магнитным полем. Подобное явление может быть использовано для образования больших, но кратковременных магнитных полей в земных условиях. В одном из экспериментов первоначальное магнитное поле с напряженностью 4—8 МА/м образовалось внутри медного цилиндра от разряда конденсаторной батареи на соленоид. Одновременно ударная волна от детонации окружающего взрывчатого вещества сминала цилиндр и «вмороженное» в него магнитное поле. В процессе сжатия в течение около 2 мкс удавалось получить магнитное поле с напряженностью 1,1 ГА/м. Принцип сжатия «вмороженного» в жидкий металл магнитного поля применяется в гидромагнитах.

Аналогию между распространением магнитного поля в проводящей среде и явлением диффузии наиболее отчетливо можно проследить в другом частном случае, когда среда неподвижна и

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu_0} \nabla^2 \mathbf{B}.$$

Сравнение этого уравнения с уравнением диффузии $\partial \rho / \partial t = D \nabla^2 \rho$ показывает, что проникновение электромагнитного поля в неподвижный проводник происходит по таким же законам, как и изменение давления газа в процессе диффузии. Своеобразным коэффициентом «диффузии» магнитного поля является величина $(\gamma \mu_0)^{-1}$ — аналог коэффициента D . С ошибкой менее 5% можно считать, что расстояние половинного затухания магнитного поля, играющее роль глубины проникновения, $\delta \approx \sqrt{t / \gamma \mu_0}$, где t — время наблюдения (время диффузии). Явление «вмороженности» магнитных линий не является специфически магнитогидродинамическим явлением, поскольку оно может быть сведено к малой глубине «диффузии» магнитного поля на поверхности покоящегося проводника.

МАГНИТНОЕ ДАВЛЕНИЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАСОСЫ И УСКОРИТЕЛИ

В гидродинамическом уравнении движения Навье — Стокса специфику магнитогидродинамики выражает векторное произведение $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$. Именно оно выражает ту дополнительную силу, которая определяется магнитным полем. Пользуясь первым уравнением Максвелла и формулами векторного анализа, можно записать:

$$\begin{aligned} \mathbf{J} \times \mathbf{B} &= -\frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \times \operatorname{rot} \mathbf{E} = \\ &= -\operatorname{grad} w_m + \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{B}, \end{aligned}$$

где $w_m = B^2 / 2 \mu_0 = HB / 2$.

Сравнивая последнюю формулу с уравнением движения, нетрудно видеть, что в нем объемная плотность магнитной энергии w_m может рассматриваться как магнитное давление $p_B = w_m$. Наиболее отчетливо это проявляется в тех простых

геометрических конфигурациях, где магнитное поле однородное и вторым слагаемым в последней формуле можно пренебречь. Тогда (и только тогда) сила определяется выражением $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\operatorname{grad} p_B$. Для этих условий из уравнения движения следует $p + p_B = 0$, т. е. любое изменение механического давления жидкости или плазмы должно компенсироваться противоположным изменением магнитного давления p_B .

Существование магнитного давления делает возможной работу разнообразных магнитных насосов и ловушек. В исследовании управляемых термоядерных реакций магнитное поле используется для изоляции плазмы, нагретой до миллионов градусов Цельсия, от стенок заключающего ее сосуда. Размеры плазменного канала с током определяются сжимающим действием магнитного давления (пинч-эффект), уравнивающего давление раскаленной плазмы. Правда, в таких установках магнитное давление является источником неустойчивостей, вызванных локальными сжатиями и изгибами плазмы с током.

Магнитное давление может быть использовано помимо удерживания плазмы также для разгона ее до больших скоростей. В обоих случаях магнитные поля могут создаваться токами либо во внешних проводниках, либо в самой плазме. Те же принципы применяются в электромагнитных насосах, служащих для перекачки расплавленных металлов. Простейшим устройством является *кондукционный электромагнитный насос*.

В насосе канал с проводящей жидкостью помещен между полюсами магнита. Электроды, расположенные в канале, позволяют иметь ток в жидкости поперек канала и магнитного поля. Сила, возникающая при взаимодействии тока и магнитного поля, заставляет поток жидкости двигаться по каналу. Ток возбуждается внешним электрическим полем и является током проводимости или, как говорят иногда, током кондукции, почему насос и называют кондукционным.

Электромагнитные насосы, в которых ток обеспечивают не электроды, а он возбуждается (индуцируется) переменными магнитными полями, называют *индукционными насосами*. Наибольшее распространение получили МГД-насосы с линейным плоским или цилиндрическим каналом и машины с винтовым каналом.

Жидкометаллические насосы начали находить применение вначале в связи с развитием реакторов на быстрых нейтронах. В таких реакторах МГД-машины используются в качестве насосов для перекачивания лития, калия, натрия при высоких температурах. По сравнению с механическими насосами их преимуществом является отсутствие движущихся механических частей, уплотнений, сложных подшипниковых узлов и тому подобного, что приводит к увеличению надежности и простоте обслуживания. Электромагнитные насосы мощностью до нескольких сот киловатт полностью вытеснили механические насосы из вспомогательных систем ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Намечается широкое применение электромагнитных насосов в основных контурах станций с реакторами

на быстрых нейтронах. Все шире такие насосы и другие типы МГД-устройств (перемешиватели, лотки, дроссели, дозаторы) используются в металлургии, литейном производстве, химической промышленности, позволяя механизировать и автоматизировать многие тяжелые производственные операции с жидким алюминием, цинком, свинцом, ртутью, чугуном и сталью.

Свободное парение проводящего тела в переменном магнитном поле можно также рассматривать как своеобразный критический режим электромагнитного насоса. Подвеска алюминиевого тела без подшипников при помощи переменного магнитного поля может найти применение в расходомере, подвешенном в потоке жидкости или газа. Но наиболее важное применение это явление нашло в «электромагнитном тигле», который позволяет плавить сверхчистые тугоплавкие металлы, весьма активные при высоких температурах, без соприкосновения с какими-либо огнеупорными материалами.

Ускорение плазмы по схеме кондукционного насоса называют ускорением в скрещенных магнитных полях. Ускорение по схеме индукционного насоса лежит в основе асинхронного плазменного двигателя. В обоих случаях магнитные поля создаются токами в специальных обмотках. Известны также «рельсовые схемы», в которых плазма ускоряется между двумя параллельными прямыми металлическими проводниками («рельсами») с токами, замыкающимися через плазму. Симметричное магнитное поле самой плазмы только сжимает токовый шнур. Виток, образованный «рельсами» и плазмой, приводит к концентрации магнитного поля с одной стороны проводящего газа. Возникающее избыточное магнитное давление толкает плазму вдоль проводов. Для впрыскивания плазмы в магнитные ловушки сконструированы плазменные пушки, основанные на том же принципе и имеющие более удобную коаксиальную конструкцию, в которой каналом служит кольцевая щель между двумя параллельными цилиндрами. В этот промежуток и подается плазма быстродействующим клапаном. Радиальный ток в плазме, взаимодействуя с коаксиальным магнитным полем этого же тока, выталкивает плазму из пушки.

Приборы для ускорения плазмы аналогичны электродвигателю. По принципу действия двигателя постоянного тока происходит ускорение в скрещенных магнитных полях, по принципу действия асинхронного двигателя — бегущим магнитным полем. Электрический двигатель можно превратить в генератор. С плазменным двигателем можно сделать то же самое, если его заставить не ускорять, а тормозить плазму. При этом кинетическая энергия плазменного потока будет преобразовываться в электрическую. Получается плазменный генератор или, как его называют, МГД-генератор. Аналогичный принцип используют жидкометаллические МГД-генераторы.

2.4. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В основе работы квантовых усилителей и генераторов лежит эффект индуцированного (вынужденного) излучения. Он заключается в том, что под

воздействием внешнего электромагнитного поля частица может излучать квант энергии.

Молекулы, атомы, ионы и электроны образуют микросистему, движение и ориентация микрочастиц которой определяют энергетическое состояние или энергетические уровни. Внутренняя энергия микрочастиц квантована. Они могут переходить только с одного энергетического уровня на другой. Если конечная внутренняя энергия микросистемы при воздействии на нее электромагнитных колебаний больше начальной энергии, то разность между ними пополняется за счет поглощения энергии электромагнитного поля. И наоборот, если энергия отдается электромагнитному полю, происходит излучение и конечное состояние системы соответствует меньшей энергии, чем начальное.

Энергия поля излучения (фотонов) также квантована, так что обмен энергией между электромагнитным полем и микросистемой может происходить только дискретно. Если энергия частицы в верхнем энергетическом состоянии W_2 , а в нижнем W_1 , то частота ν_{21} электромагнитных колебаний при переходе частицы из одного энергетического состояния в другое определяется условием Бора

$$W_2 - W_1 = h \nu_{21}.$$

Если микросистема находится в верхнем энергетическом состоянии, то имеется определенная вероятность того, что через некоторый промежуток времени она перейдет в нижнее энергетическое состояние и произойдет излучение энергии. Эта вероятность имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая аналогична вероятности распада реактивного вещества: она зависит от свойств системы и данного квантового перехода и не зависит от внешних факторов. Переменная составляющая зависит от плотности энергии внешнего электромагнитного поля. Электромагнитное поле с частотой квантового перехода повышает вероятность излучения системой, находящейся в верхнем энергетическом состоянии.

Когда внешнее электромагнитное поле отсутствует, может происходить самопроизвольное электромагнитное излучение, называемое спонтанным излучением. Если на микросистему воздействует внешнее электромагнитное поле с частотой квантового перехода, то спонтанное излучение происходит по-прежнему, причем фазы испускаемого излучения не зависят от внешнего электромагнитного поля. Переходы, вызванные внешним электромагнитным полем с частотой квантового перехода, сопровождаются излучением, находящимся в определенном фазовом соотношении с внешним полем. Этот процесс называется вынужденным или индуцированным излучением.

Микросистема, находящаяся в верхнем энергетическом состоянии, может, таким образом, стать источником излучения. Микросистема, находящаяся в нижнем энергетическом состоянии, способна только поглощать излучение с частотой квантового перехода. Микросистема может усиливать или генерировать излучение только в том случае, когда количество частиц (населенность) на верхнем энер-

гетическом уровне больше, чем на нижнем. Такое состояние системы называют возбужденным или инверсным, так как в условиях термодинамического равновесия населенность нижнего (основного) энергетического уровня всегда больше.

Для достижения возбужденного состояния микросистема должна поглотить энергию не обязательно в виде излучения. Требуемая энергия может быть получена путем электронной или ионной бомбардировки, механическим воздействием, нагреванием и другими способами.

После прохождения в поглощающей среде пути l интенсивность (мощность) электромагнитного излучения $I \approx I_0 \exp(-k l)$, где коэффициент поглощения $k = \sigma(N_1 - N_2) + k_0$ увеличивается с ростом разности населенности N_1 и N_2 нижнего и верхнего энергетических уровней и поперечного сечения поглощения σ (k_0 — коэффициент нерезонансных потерь). В условиях термодинамического равновесия или близких к ним $N_1 > N_2$, $k > 0$ система всегда ведет себя как поглощающая. Для возбужденной системы характерны инверсия населенностей N_2 и N_1 и отрицательное значение коэффициента поглощения ($k = -\alpha < 0$). В этом случае плотность проходящего излучения по мере прохождения через среду начинает увеличиваться по экспоненциальному закону $I = I_0 \exp(\alpha l)$. В этом и заключается эффект квантового усиления.

Мощность излучения, выходящего из такого усилителя, тем больше, чем больше частиц участвует в переходах с верхнего энергетического уровня на нижний. При этом возрастает коэффициент усиления $\alpha = \sigma(N_2 - N_1) - k_0$. Усиление тем больше, чем больше путь l , пройденный лучом. Значительного увеличения этого пути можно добиться, помещая среду в оптический резонатор, обеспечивающий многократное прохождение за счет многократных отражений излучения. В диапазоне сверхвысоких частот для этой цели используются объемные полые металлические резонаторы. В оптическом диапазоне резонатор образует два параллельных зеркала. Оптический резонатор способствует достижению уровня обратной связи, который позволяет превратить квантовый усилитель в квантовый генератор. Это происходит, когда уровень усиления превысит потери энергии, а инверсная населенность превысит пороговое значение $N_2 - N_1 \approx \gamma/\sigma L$, где γ — коэффициент потерь; L — длина оптического резонатора.

Излучение оптического квантового генератора обусловлено индуцированными переходами, которые происходят одновременно у большого количества возбужденных частиц, и поэтому имеет большую мощность. Вынужденное излучение происходит синфазно с индуцирующим излучением. Поэтому при индуцированном возбуждении обеспечивается фазовая когерентность и происходит сложение полей элементарных излучателей. В результате мощность результирующей волны возрастает и может достигнуть уровня межмолекулярных полей. При спонтанном излучении, представляющем собой неупорядоченный статистический процесс, когерентность отсутствует и генерируются лишь шумы.

Характерными особенностями излучения лазеров (оптических квантовых генераторов) являются когерентность, монохроматичность излучения и узконаправленность. Узконаправленность обеспечивается селективным характером усиления параксиальных лучей зеркалами оптического резонатора.

Для возбуждения активного элемента лазера используется источник накачки. Он обеспечивает такое распределение атомов по энергетическим уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Двухуровневый метод предполагает использование для возбуждения тех же двух собственных состояний (уровней) системы, которые используются в процессе усиления. Поэтому инверсия и усиление должны быть разделены либо в пространстве, либо во времени.

Если инверсия и усиление разделены во времени, то для усиления и генерации используется та же среда, что и в процессе инверсии. Это означает, что система не может функционировать в качестве усилителя по крайней мере в течение времени, необходимого для осуществления инверсии. Такие системы могут быть использованы только в импульсном режиме и поэтому имеют ограниченную область применения.

При непрерывно действующем возбуждении ансамбль микросистем инвертируется вне области усиления. Затем возбужденная система вводится в область усиления, взаимодействует с полем сигнала и, наконец, выводится оттуда. Примером метода сортировки молекулярного пучка является первый работавший квантовый усилитель на пучке молекул аммиака ($\lambda = 1,25$ см).

Трехуровневый метод основан на эффекте насыщения одного из переходов (между основным и верхним уровнями) под воздействием вспомогательного излучения для получения инверсии населенностей между другой парой уровней этой системы (между основным и промежуточным метастабильным уровнями). Основным преимуществом этого метода является независимость систем возбуждения и усиления, поскольку для них резонансные частоты различны. Этот метод используется в рубиновых квантовых генераторах ($\lambda = 694,3$ нм).

Большой эффективностью обладает четырехуровневый метод возбуждения за счет того, что усиление происходит при переходах с метастабильного уровня не на сильно населенный основной, а на более высокий уровень (возбуждения) с меньшей населенностью. Поэтому инверсная населенность между этими уровнями может быть достигнута при относительно низких мощностях накачки (когда населенность самого верхнего уровня сравнительно мала). Четырехуровневый метод используется в неодимовых лазерах ($\lambda = 1,06$ мкм).

По типу фазового состояния активного вещества лазеры делятся на газовые, твердотельные и жидкостные.

В газовых лазерах для накачки используют разряды трех видов.

1. Тлеющий, или высокочастотный, разряд. Для непрерывно действующих лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется столб тлеющего

разряда при плотности тока $0,1 - 0,2 \text{ А/см}^2$. Электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока, а средняя электронная температура определяется в большинстве случаев произведением давления газа в трубке и ее диаметра.

2. Импульсный разряд с послесвечением. Значительные плотности тока — до 300 А/см^2 позволяют получить импульсную генерацию с большими усилением и выходной мощностью. В послесвечении разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации.

3. Импульсный разряд короткой длительности используется для накачки лазеров на самоограниченных переходах. Достижение инверсной населенности возможно только тогда, когда время нарастания импульса тока сравнимо с радиационным временем жизни верхнего энергетического уровня. При этом необходимые значения плотности тока достигают тысяч ампер на квадратный сантиметр.

В перечисленных условиях инверсная населенность достигается в результате действия одного или нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения: передача возбуждения (потенциальной энергии) от одного атома к другому в результате неупругого столкновения, передача возбуждения при диссоциации, оптическая накачка в результате селективного возбуждения (на резонансной частоте перехода), возбуждение атома неупругим электронным ударом, накачка излучательными каскадными переходами, возбуждение при нейтрализации зарядов двух ионов, фотодиссоциация молекул (если энергия фотона достаточна для диссоциации молекул, возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам).

В твердотельных лазерах используются в качестве активной среды примесные кристаллы, стекла и полупроводники. Генерация и усиление осуществляются в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, внедренных в решетку основного кристалла, в устойчивое состояние. Накачка производится оптически, чаще всего с помощью газоразрядных ламп. Кроме ионов-активаторов в кристаллы вводят иногда другие ионы, называемые сенсibilизирующими добавками. Они позволяют получить дополнительное поглощение энергии накачки и передать ее лазерному иону, повышая таким образом эффективность преобразования.

В лазерах на основе стекол, легированных ионами редкоземельных элементов, генерация и усиление излучения осуществляются при переходах этих ионов с возбужденных на устойчивые уровни. В качестве активаторов используются трехвалентные ионы Nd, Tb, Yb, Ho и Er. Лазеры на активированных стеклах работают в подавляющем большинстве в импульсном режиме с использованием для оптической накачки ксеноновых газоразрядных ламп.

В полупроводниковых лазерах генерация и излучение происходят на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зоной и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне самого полупроводника. Наибольшую эффективность и распространение имеет накачка путем инжекции носителей заряда и облучением

пучком быстрых электронов. Используются иногда оптическая накачка и ударная ионизация при лавинном пробое. При комнатной температуре генерация получена в кристаллах GaAs , $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, CdS и ZnO .

Наиболее широкое применение получили генераторы на арсениде галлия ($\lambda = 830 \div 910 \text{ нм}$).

В жидкостных лазерах используются в качестве активной среды растворы, содержащие либо ионы редкоземельных элементов, либо органические красители. В этих лазерах применяют оптическую накачку импульсными ксеноновыми газоразрядными лампами или интенсивное излучение других лазеров. В лазерах на хелатах активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель, связанные с органическими группами или лигандами. В качестве лиганд наиболее часто употребляют бензолацетон, дибензильметан, пентафторпропионат, тенонитрифторацетон и трифторацетилацетон, в качестве катионов — пиперидин, пиридин, натрий, аммиак и имидазол; в качестве растворителей — спирты (этанол, метанол), диметилформамид, ацетонитрил и диметилсульфоксид. Из апротонных жидких материалов лазерный эффект достигнут в растворе соли редкоземельного элемента неодима (Nd^{+3}) в неорганическом растворителе (селен- и фосфорсисхлоридах). Лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазоновых, антраценовых, кумароновых, акридиновых, ксантеновых и полиметриновых.

Мощность и длительность излучения зависит от режимов генерации лазеров. Непрерывная, или *стационарная, генерация* используется преимущественно в газовых лазерах.

В твердотельных лазерах, в резонаторе которых находится только активный элемент и нет каких-либо нелинейных элементов, свойства которых изменяются под воздействием внешних сигналов, реализуется *режим свободной генерации*. Подобный режим может иметь место как при непрерывной, так и при импульсной накачке. При этом обычно возникает *пикочный режим*, характеризуемый наличием пульсаций, которые могут быть регулярными или нерегулярными, затухающими или незатухающими. Мощность отдельного пика может достигать 10^5 Вт , а длительность — $0,1 - 1 \text{ мкс}$.

Модуляция добротности резонатора позволяет в начальной фазе, при низкой добротности (высокий уровень потерь) получить значительное превышение инверсной населенности над уровнем инверсии при свободной генерации. После этого добротность быстро увеличивается (потери понижаются) и высвечивается короткий световой импульс большой мощности. Этот режим получил название *накопительного* или *режима генерации гигантских импульсов*. Мощность импульсов достигает 10^9 Вт , а минимальная длительность — 1 нс .

Режим синхронизации мод основан на интерференции нескольких синхронизированных собственных типов (мод) продольных колебаний оптического резонатора. В результате возникает последовательность сверхкоротких световых импульсов. Длительность импульсов достигает 1 пс , а мощность — 10^{10} Вт .

Освоение ультракороткого диапазона длительностей связано с использованием *сжатия сверхкоротких импульсов* в нелинейных средах с дисперсией. В солитонных лазерах для этой цели используются свойства стационарной уединенной волны в световоде, вводимом в резонатор лазера. Для сжатия лазерных импульсов используется также их частотная модуляция и компрессия. Таким образом достигнута длительность импульса 6 фс в видимом диапазоне и 40 фс в инфракрасном диапазоне длин волн, что составляет один период колебаний ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). Один период оптического колебания — это предельная длительность светового импульса, но одновременно и предельная «скорость» оптического отклика материальной среды. В фемтосекундном импульсе достигнуты мощности до 10^{12} Вт .

В поле сфокусированных фемтосекундных импульсов получены напряженности электрического поля, превышающие на порядок внутриатомные (для атома водорода 10^9 В/см).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 2.1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989.
- 2.2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Энергоиздат, 1981.
- 2.3. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафе-

ев В.И. Гальваноманнитные приборы. М.: Радио и связь, 1983.

2.4. Зайцев Ю.В., Громов В.С., Григораш Т.С. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи. М.: Радио и связь, 1985.

2.5. Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.

2.6. Зорин А.Б., Лихарев К.К., Семенов Б.К. Новые перспективы в сверхпроводниковой электронике// Зарубежная электроника. 1989. №11. С. 3—15.

2.7. Половин Р.В., Демуцкий В.П. Основы магнитной гидродинамики. М.: Энергоатомиздат, 1987.

2.8. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. Киев: Высшая школа, 1988.

2.9. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.

2.10. Кухаркин Е.С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика. М.: Высшая школа, 1982.

2.11. Таблицы физических величин/ Под ред. П.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

2.12. ГОСТ 22622-77. Материалы полупроводниковые. Термины и определения.

2.13. ГОСТ 23869-79. Материалы сверхпроводниковые. Термины и определения.

2.14. ГОСТ 21515-70. Материалы диэлектрические. Термины и определения.

Раздел 3

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

СОДЕРЖАНИЕ

3.1. Элементы электрических цепей и схем	38	3.4. Основные свойства и преобразования линейных цепей	51
Электрические цепи и схемы (38). Элементы цепи и схемы замещения (38). Модели элементов при постоянных, гармонических, периодических и непериодических напряжениях и токах (41)		Принцип наложения (51). Принцип компенсации (51). Принцип взаимности (51). Теорема об активном двухполюснике (52). Теорема вариаций (52). Применение преобразований для расчета сложных цепей (52). Сигнальные графы (53).	
3.2. Топологические уравнения	44	3.5. Расчет частотных характеристик цепей .	55
Законы Кирхгофа (44). Графы электрических цепей (44). Топологические матрицы (45)		Частотные характеристики (55). Резонансные контуры (56)	
3.3. Методы расчета линейных цепей при установившемся режиме	46	3.6. Четырехполюсники и фильтры	57
Компонентные уравнения в комплексной форме (46). Полная система уравнений цепи (47). Узловые уравнения (48). Контурные уравнения (48). Расширенные узловые уравнения (49). Топографические векторные диаграммы (50). Особенности уравнений для цепей с постоянными и несинусоидальными периодическими напряжениями и токами (50). Расчет мощностей (51)		Уравнения и параметры четырехполюсников (57). Пассивные фильтры (59)	
		3.7. Трехфазные цепи	60
		Трехфазная система с нейтральным проводом (60). Трехфазная система без нейтрального провода (60). Симметричная трехфазная система (61). Метод симметричных составляющих (61). Высшие гармоники в трехфазных цепях (62)	

3.8. Расчет переходных процессов в линейных цепях	62	3.10. Нелинейные резистивные цепи	70
Законы коммутации (62). Классический метод (62). Интегралы наложения (64). Операторный метод (64). Метод переменных состояния (66). Решение уравнений состояния (67)		Компонентные уравнения (70). Топологические уравнения (70). Узловые, контурные и расширенные узловые уравнения (70). Итерационные линейные модели нелинейных резистивных цепей (71)	
3.9. Цепи с распределенными параметрами.	67	3.11. Магнитные цепи	71
Линия с потерями (67). Определение постоянных линий по опытам холостого хода и короткого замыкания (67). Упрощенные формулы (68). Линия с малыми потерями (68). Линия без потерь (68). Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами (69)		Магнитные цепи постоянного тока (71). Магнитные цепи переменного тока (72)	
		3.12. Переходные процессы в нелинейных цепях	72
		Список литературы	73

3.1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И СХЕМ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СХЕМЫ

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

Интегральными переменные — электродвижущая сила (ЭДС) e , ток i , напряжение u — в общем случае являются функциями времени t .

Ток в любой момент времени (мгновенное значение тока) $i(t)$ представляет собой скорость изменения заряда $q(t)$ во времени (например, заряда, переносимого через одно и то же сечение проводника)

$$i(t) = dq(t) / dt.$$

Напряжение в любой момент времени (мгновенное значение напряжения) $u(t)$ между произвольными точками цепи 1 и 2 совпадает с разностью потенциалов φ этих точек:

$$u(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t).$$

Элементами цепи могут быть источники энергии (генераторы), линии передачи энергии, резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, трансформаторы и т.д.

По типу параметров элементов цепи разделяются на:

цепи с сосредоточенными параметрами, описываемые обыкновенными дифференциальными и алгебраическими уравнениями, в которых переменные не зависят от пространственных координат;

цепи с распределенными параметрами, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных и алгебраическими уравнениями, в которых переменные являются функциями времени и пространственных координат;

линейные цепи, параметры элементов которых не зависят от напряжений и токов;

нелинейные цепи, параметры элементов которых зависят от напряжений и токов;

параметрические (нестационарные) или непараметрические (стационарные) цепи, параметры

элементов которых зависят или соответственно не зависят от времени;

детерминированные или недетерминированные цепи, у которых параметры и переменные являются соответственно детерминированными или случайными величинами и функциями.

Строго говоря, электрические цепи могут быть отнесены к определенному типу лишь при идеализации процессов в них, выделении наиболее существенных для решаемой задачи сторон этих процессов.

При рассмотрении процессов в реальной электрической цепи ее элементы заменяются элементами схемы замещения (схемными моделями). Графическое изображение цепи, содержащее условные изображения ее элементов, показывающее соединения этих элементов, называют схемой электрической цепи. Схема замещения отображает наиболее существенные параметры реальных элементов цепи и способ их соединения.

ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕПИ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Элементы цепи по количеству внешних зажимов n , которыми они соединяются с другими элементами, делятся на двухполюсные ($n = 2$) и многополюсные ($n > 2$). Для двухполюсного элемента или участка цепи мгновенная мощность $p(t)$ определяется выражением

$$p(t) = u(t) i(t),$$

если положительные направления напряжения и тока (указываются стрелками на схеме) выбраны совпадающими. В этом случае $p(t) > 0$ (или $p(t) < 0$) соответствуют потребляемой (или отдаваемой) мощности. Энергия, поступившая в двухполюсный элемент или участок цепи за промежуток времени от t_0 до t , определяется соотношением

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau,$$

где τ — постоянная интегрирования.

Для многополюсных элементов, у которых зажимы разделены на пары, мощность $p(t)$ и энергия $W(t_0, t)$ определяются как сумма соответствующих величин для каждой пары зажимов. При этом пары

зажимов могут быть различными или один из зажимов может быть общим для каждой пары.

В зависимости от знака значения энергии элементы цепи делятся на активные и пассивные. К активным относятся, например, двухполюсные генераторы электрической энергии ($W(t_0, t) < 0$ для любых t); к пассивным — резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки ($W(t_0, t) \geq 0$). Аналогичное деление справедливо и для многополюсных элементов.

Источники электрической энергии могут быть отображены простейшими моделями: источником электродвижущей силы ЭДС (напряжения) и источником тока (рис. 3.1, а, б). У источника (идеального) ЭДС $e(t)$ напряжение $u(t) = e(t)$ и не зависит от тока $i(t)$. У источника (идеального) тока $J(t)$ ток $i(t) = J(t)$ и не зависит от напряжения $u(t)$. Для указанных на рис. 3.1 положительных направлений напряжения и тока энергия источников $W(t_0, t) > 0$, если источник отдает энергию, и $W(t_0, t) < 0$ при потреблении источником энергии.

Пассивный двухполюсный резистивный элемент (резистор) (рис. 3.2, а) в общем случае описывается нелинейной вольт-амперной характеристикой $u(i)$ или вольт-амперной характеристикой $i(u)$. Вольт-амперная характеристика линейного резистора (рис. 3.2, б) линейна и характеризуется уравнениями

$$u(t) = R i(t), \quad i(t) = G u(t),$$

где R — сопротивление, $G = 1/R$ — проводимость резистора, являющиеся параметрами элемента и не зависящие от тока и напряжения. Записанные уравнения характеризуют закон Ома для рассматриваемого элемента.

Индуктивный нелинейный элемент (катушка) (рис. 3.3, а) характеризуется зависимостью потокосцепления Ψ от тока i — вебер-амперной характеристикой $\Psi(i)$ или характеристикой $i(\Psi)$. Здесь потокосцепление равно сумме магнитных потоков, сцепленных с каждым витком индуктив-

ной катушки, и учитывает потокосцепление внутри проводника. Для линейного индуктивного элемента (рис. 3.3, б) функция $\Psi(i)$ линейна

$$\Psi(t) = L i(t),$$

где L — индуктивность элемента, которая является его параметром и не зависит от тока.

Дифференцируя функцию потокосцепления, получаем напряжение на линейном индуктивном элементе

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt},$$

соответственно ток

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau.$$

Емкостный нелинейный элемент — конденсатор (рис. 3.4, а) характеризуется кулон-вольтной характеристикой $q(u)$ или характеристикой $u(q)$, где q — заряд конденсатора. Для линейного емкостного элемента (рис. 3.4, б) заряд

$$q(t) = C u(t),$$

где C — емкость конденсатора, которая является его параметром и не зависит от напряжения. Дифференцируя уравнение заряда, получаем ток линейного емкостного элемента

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Напряжение на таком элементе

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau.$$

К многополюсным пассивным элементам относятся, в частности, индуктивно связанные ветви (катушки), т. е. ветви, связанные общим магнитным потоком. Две линейные индуктивно связанные ветви (рис. 3.5, а) описываются уравнениями

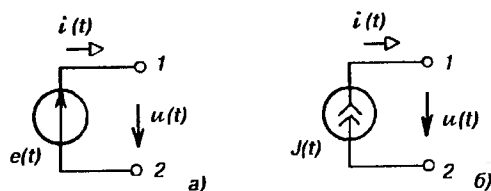


Рис. 3.1

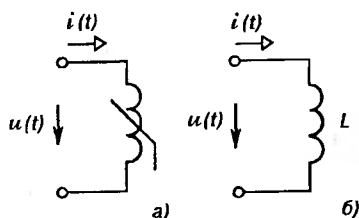


Рис. 3.3

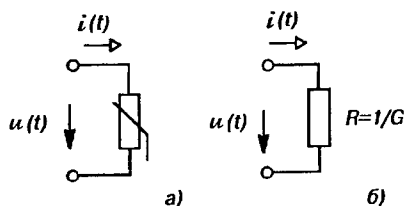


Рис. 3.2

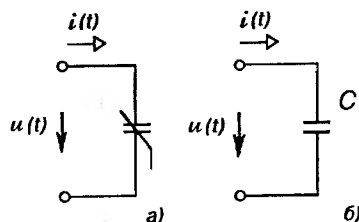


Рис. 3.4

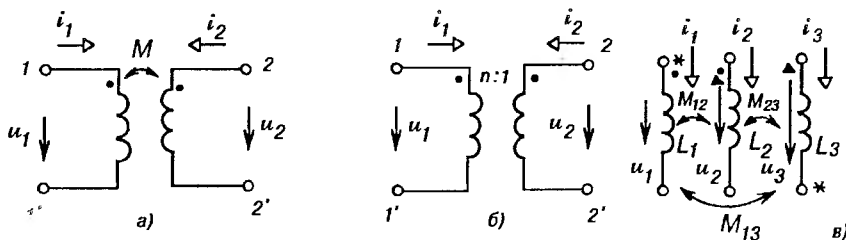


Рис. 3.5

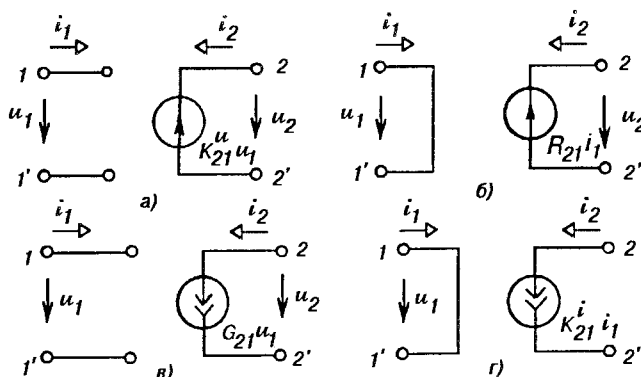


Рис. 3.6

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt};$$

$$u_2 = M_{21} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt},$$

$$u_2 = M_{21} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt};$$

$$u_3 = -M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + L_3 \frac{di_3}{dt},$$

где L_1, L_2 — собственные индуктивности катушек; $M_{12} = M_{21} = M > 0$ — взаимные индуктивности катушек.

В записанных уравнениях слагаемые $M di_2 / dt$ и $M di_1 / dt$ учитываются со знаком «плюс», если напряжение u_1 и ток i_2 (u_2 и i_1) направлены одинаково относительно одноименных зажимов, отмеченных точками; при различных направлениях указанных переменных слагаемые, содержащие взаимную индуктивность, учитываются со знаком «минус».

Если $L_1 \rightarrow \infty$, $L_2 \rightarrow \infty$, $M_{12} = M_{21} = \sqrt{L_1 L_2}$ и $\sqrt{L_1 / L_2} = n$, то катушки образуют идеальный трансформатор (рис. 3.5, б) с коэффициентом трансформации n , для которого справедливы уравнения

$$u_1 = n u_2, \quad i_1 = -i_2 / n.$$

При произвольном числе индуктивно связанных катушек уравнения записываются аналогично. Например, для трех катушек (рис. 3.5, в) одноименные зажимы каждой пары отмечены различными знаками (точками, звездочками, треугольниками); учитывая положительные направления напряжений и токов относительно одноименных зажимов, получаем

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} - M_{13} \frac{di_3}{dt};$$

где $M_{12} = M_{21} > 0$; $M_{13} = M_{31} > 0$; $M_{23} = M_{32} > 0$.

Примерами простых активных многополюсников служат управляемые (зависимые) источники: источник напряжения (ЭДС), управляемый напряжением — ИНУН (рис. 3.6, а); источник напряжения, управляемый током — ИНУТ (рис. 3.6, б); источник тока, управляемый напряжением — ИТУН (рис. 3.6, в); источник тока, управляемый током ИТУТ (рис. 3.6, г). Управляемые источники описываются уравнениями:

$$\text{ИНУН: } i_1 = 0; \quad u_2 = K_{21}^u u_1;$$

$$\text{ИНУТ: } u_1 = 0; \quad u_2 = R_{21}^i i_1;$$

$$\text{ИТУН: } i_1 = 0; \quad i_2 = G_{21}^u u_1;$$

$$\text{ИТУТ: } u_1 = 0; \quad i_2 = K_{21}^i i_1,$$

где $K_{21}^u, R_{21}^i, G_{21}^u, K_{21}^i$ — параметры управляемого источника.

Рассмотренные схемные элементы (см. рис. 3.1 — 3.6) являются простейшими. Они отображают основные свойства реальных элементов цепи и могут применяться для построения математических моделей реальных элементов в целях повышения точности отображения протекающих в них процессов. Например, модель реального генератора энергии, учитывающую его внутреннее сопротивление, можно получить, добавляя к схемам идеальных источников (см. рис. 3.1) резистивный элемент. Идеальный трансформатор может использоваться как часть модели реального трансформатора в

сочетании с другими схемными элементами, например резистивными и индуктивными. Управляемые источники широко применяются при построении моделей электронных элементов (биполярных и полевых транзисторов, интегральных микросхем).

Все уравнения, описывающие рассмотренные элементы электрических схем, относят к компонентным уравнениям, которые не зависят от способа соединения элементов в цепи.

МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОСТОЯННЫХ, ГАРМОНИЧЕСКИХ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ И НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ТОКАХ

В простейшем случае ЭДС и ток источников (см. рис. 3.1) не зависят от времени: $e(t)=E$, $j(t)=J$ и называются постоянными ЭДС и током.

При постоянных напряжениях и токах индуктивный и емкостный элементы представляют собой соответственно короткозамкнутую ($u=0$) и разомкнутые ветви ($i=0$). Уравнения для резистивного элемента и управляемого источника соответствуют приведенным выше.

На практике широкое применение находят синусоидальные (гармонические) источники ЭДС и тока. Для источника ЭДС в этом случае (рис. 3.7)

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

где E_m — амплитуда; ψ_e — начальная фаза; $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ — угловая частота (T — период, f — частота, Гц).

Действующее значение $E = E_m / \sqrt{2}$ равно среднеквадратичному за период

$$E = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^2 d\omega t \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt \right)^{1/2}$$

Аналогично записываются любые гармонические напряжения и токи.

Применяются также источники периодических сигналов (ЭДС и токов) различной формы. Такие сигналы, например ЭДС $e(t)$, удовлетворяющие условиям Дирихле, можно представить в виде ряда Фурье

$$e(t) = E_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [E_{sk} \sin(k\omega_1 t) + E_{ck} \cos(k\omega_1 t)] =$$

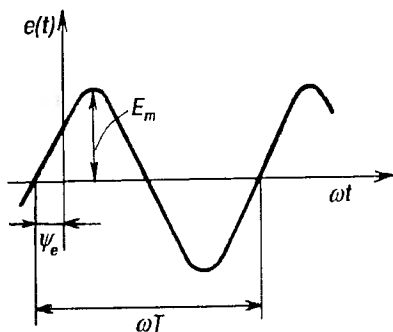


Рис. 3.7

$$= E_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (E_{mk} \sin(k\omega_1 t + \psi_k)); \omega_1 = 2\pi/T;$$

$$E_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) dt; E_{sk} = \frac{2}{T} \int_0^T e(t) \sin(k\omega_1 t) dt;$$

$$E_{ck} = \frac{2}{T} \int_0^T e(t) \cos(k\omega_1 t) dt,$$

где E_0 — постоянная составляющая (среднее значение за период); $E_{mk} = \sqrt{E_{sk}^2 + E_{ck}^2}$ — амплитуда; $\psi_k = \arctg(E_{ck}/E_{sk})$ — начальная фаза k -й гармоники с частотой $k\omega_1$; ω_1 — частота основной (первой) гармоники.

Для напряжений и токов ряд Фурье записывается аналогично. С помощью формулы Эйлера для комплексных чисел ряд Фурье может быть записан в комплексной форме

$$e(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{E}_{mk} e^{jk\omega_1 t},$$

где $\dot{E}_{mk} = E_{mk} e^{j\psi_k} = \frac{2}{T} \int_0^T e(t) e^{-jk\omega_1 t} dt$ —

комплексная амплитуда k -й гармоники; $\dot{E}_{m(-k)} = E_{mk} e^{-j\psi_k} = E_{mk}^*$ — комплексно-сопряженная амплитуда.

Совокупность амплитуд гармоник дает дискретный (линейчатый) спектр амплитуд, а совокупность начальных фаз — фазовый спектр, которые можно изобразить графически.

Действующее значение несинусоидальной периодической ЭДС определяется как

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} = \sqrt{E_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} E_k^2},$$

где $E_k = E_{mk} / \sqrt{2}$.

Примеры несинусоидальных функций $f(t)$ (ЭДС, напряжений, токов) и их разложение в ряд Фурье приведены в табл. 3.1.

Непериодические сигналы (например, импульсные) при условии их абсолютной интегрируемости можно представить с помощью интегральных преобразований Фурье

$$e(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(j\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

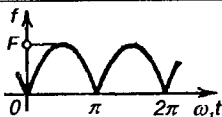
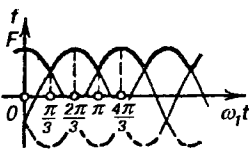
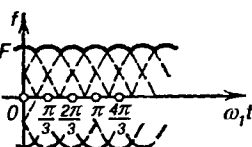
$$E(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Здесь вторая формула определяет прямое преобразование, а первая — обратное преобразование Фурье. Комплексную функцию $E(j\omega)$ называют спектральной характеристикой, или спектральной плотностью. Модуль $E(\omega) = |E(j\omega)|$ и аргумент $\psi(\omega) = \arg E(j\omega)$ функции $E(j\omega)$ называют соответственно амплитудной и фазовой частотными характеристиками.

Т а б л и ц а 3. 1. Разложение периодических функций в тригонометрический ряд

№	График	Разложение в ряд
1		$f(t) = \frac{4F}{\pi} \alpha \times$ $\times \left(\sin \alpha \sin \omega_1 t + \frac{1}{9} \sin 3 \alpha \sin 3 \omega_1 t + \frac{1}{25} \sin 5 \alpha \sin 5 \omega_1 t + \dots \right)$
2		$f(t) = \frac{8F}{\pi^2} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{9} \sin 3 \omega_1 t + \frac{1}{25} \sin 5 \omega_1 t - \dots \right)$
3		$f(t) = F_0 + \frac{4F}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega_1 t + \dots \right)$
4		$f(t) = mF + \frac{2F}{\pi} \left(\sin m\pi \cos \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2m\pi \cos 2\omega_1 t + \right.$ $\left. + \frac{1}{3} \sin 3m\pi \cos 3\omega_1 t + \dots \right)$
5		$f(t) = \frac{F}{2} + \frac{2F}{\pi} \left(\cos \omega_1 t - \frac{1}{3} \cos 3 \omega_1 t + \frac{1}{5} \cos 5 \omega_1 t - \dots \right)$
6		$f(t) = \frac{F}{2} - \frac{F}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2 \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega_1 t + \dots \right)$
7		$f(t) = \frac{2F}{\pi} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega_1 t - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2 \omega_1 t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4 \omega_1 t - \dots \right)$
8		$f(t) = \frac{2F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \sin \omega_1 t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2 \omega_1 t - \right.$ $\left. - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4 \omega_1 t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6 \omega_1 t - \dots \right)$

Окончание табл. 3.1

№	График	Разложение в ряд
9		$f(t) = \frac{4F}{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2 \omega_1 t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4 \omega_1 t - \dots \right)$
10		$f(t) = \frac{4F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2 \omega_1 t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4 \omega_1 t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6 \omega_1 t - \dots \right)$
11		$f(t) = \frac{3\sqrt{3}F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \cos 3 \omega_1 t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6 \omega_1 t + \frac{1}{8 \cdot 10} \cos 9 \omega_1 t - \dots \right)$
12		$f(t) = \frac{6F}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6 \omega_1 t - \frac{1}{11 \cdot 13} \cos 12 \omega_1 t + \frac{1}{17 \cdot 19} \cos 18 \omega_1 t - \dots \right)$

При синусоидальных напряжении и токе одинаковой частоты $\omega = 2\pi f$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

функциям времени можно поставить в соответствие комплексные амплитуды (действующие значения):

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} \quad (\dot{U} = U e^{j\psi_u});$$

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} \quad (\dot{I} = I e^{j\psi_i}).$$

Это соответствие взаимно однозначно, так как $\dot{U}_m$ и I_m содержат информацию об амплитудах и начальных фазах временных функций $u(t)$ и $i(t)$.

Зная уравнения, связывающие мгновенные напряжения и токи рассмотренных выше схемных элементов, легко получить соответствующие уравнения для комплексных амплитуд:

для резистора $\dot{U}_m = R \dot{I}_m$ или $\dot{I}_m = G \dot{U}_m$;

для индуктивного элемента $\dot{U}_m = \underline{Z}_L \dot{I}_m$;

для емкостного элемента $\dot{U}_m = \underline{Z}_C \dot{I}_m$,

где $\underline{Z}_L = jX_L = j\omega L$, $\underline{Z}_C = -jX_C = \frac{1}{j\omega C}$ — соответственно комплексные сопротивления индуктивного и емкостного элементов; $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$ — реактивные сопротивления этих элементов. Обратные величины

$$\underline{Y}_L = -jB_L = \frac{1}{j\omega L}; \quad \underline{Y}_C = -jB_C = j\omega C$$

— комплексные проводимости, где $B_L = 1/\omega L$, $B_C = \omega C$ — реактивные проводимости индуктивного и емкостного элементов.

Для двух индуктивно связанных ветвей при синусоидальных напряжениях и токах справедливы уравнения с комплексными амплитудами:

$$\dot{U}_{1m} = \underline{Z}_{L1} \dot{I}_{1m} + \underline{Z}_M \dot{I}_{2m};$$

$$\dot{U}_{2m} = \underline{Z}_M \dot{I}_{1m} + \underline{Z}_{L2} \dot{I}_{2m},$$

где $\underline{Z}_{L1} = j\omega L_1$, $\underline{Z}_{L2} = j\omega L_2$, $\underline{Z}_M = jX_M = j\omega M$ — комплексное сопротивление индуктивной связи; $X_M = \omega M$ — реактивное сопротивление. Слагаемое с сопротивлением $\underline{Z}_M$ может иметь положительный или отрицательный знак, как указано выше.

Полностью аналогично записываются уравнения для комплексных действующих значений.

Уравнения идеального трансформатора и управляемого источника также можно записать для комплексных амплитуд. При периодических несинусоидальных напряжениях и токах, представленных рядами Фурье, вводятся комплексные амплитуды (действующие значения) для каждой составляющей ряда и соответствующие комплексные сопротивления и проводимости:

$$\underline{Z}_{Lk} = jk\omega_1 L; \quad \underline{Y}_{Lk} = \frac{1}{jk\omega_1 L};$$

$$\underline{Z}_{Ck} = \frac{1}{jk\omega_1 C}; \quad \underline{Y}_{Ck} = jk\omega_1 C,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ — номер гармонической составляющей.

Уравнения элементов схемы, записанные с комплексными амплитудами, характеризуют простейшие модели элементов в комплексной плоскости (или в частотной области).

3.2. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ

ЗАКОНЫ КИРХГОФА

К топологическим уравнениям относятся уравнения, обусловленные способом соединения элементов и не зависящие от типа элементов. Для записи таких уравнений в схеме выделяют ветви — участки цепи, характеризующиеся одним и тем же током в начале и конце участка в любой момент времени; узлы — граничные (концевые) точки ветвей и контуры — замкнутые пути, проходящие по нескольким ветвям схемы.

Первый закон Кирхгофа: при произвольно выбранных положительных направлениях токов алгебраическая сумма токов в ветвях, присоединенных к одному и тому же узлу, равна нулю:

$$\sum_j i_j(t) = 0,$$

где суммирование осуществляется по всем ветвям, присоединенным к рассматриваемому узлу. При этом с положительным (отрицательным) знаком учитываются токи, направленные от узла (к узлу). Аналогичное уравнение справедливо для токов ветвей, пересекаемых некоторой замкнутой поверхностью.

Второй закон Кирхгофа: при известных положительных направлениях напряжений на ветвях и произвольно выбранном направлении обхода контура алгебраическая сумма напряжений на ветвях, образующих контур, равна нулю:

$$\sum_j u_j = 0,$$

где суммирование осуществляется по всем ветвям контура. При этом с положительным (отрицательным) знаком записываются напряжения, положительные направления которых совпадают (противоположны) с направлением обхода контура.

В законах Кирхгофа в общем случае учитываются токи выводов многополюсных элементов и напряжения между их зажимами.

Для комплексных амплитуд (действующих значений) уравнения Кирхгофа записываются аналогично

$$\sum_j \dot{i}_{mj} = 0, \quad \sum_j \dot{u}_{mj} = 0,$$

где j — номер ветви.

ГРАФЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Для рассмотрения топологических уравнений удобно перейти от схемы цепи к ее графу. Чтобы построить граф схемы, каждый ее двухполюсник (рис. 3.8, а) заменяется отрезком линии (рис. 3.8, б), рассматриваемым вместе с его граничными точками и называемым ветвью графа. Направление стрелки на этом отрезке указывает положительное направление напряжения и тока двухполюсника.

Если схема содержит многополюсные элементы, то каждая пара различных зажимов многополюсника (рис. 3.9, а) заменяется направленным отрез-

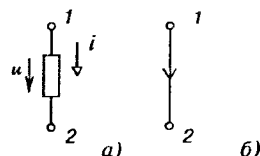


Рис. 3.8

ком (рис. 3.9, б). Когда все пары зажимов многополюсника имеют общий (базисный) зажим (рис. 3.10, а), многополюсник заменяется множеством направленных отрезков (рис. 3.10, б), также соответствующих каждой паре зажимов. Направления отрезков, указанных на рис. 3.9, б и 3.10, б, соответствуют выбранным положительным направлениям напряжений и токов каждой пары зажимов (рис. 3.9, а и 3.10, а).

Соединяя отрезки, соответствующие двухполюсным и многополюсным элементам, так, чтобы отобразить взаимосвязи всех элементов в схеме, получаем геометрическую фигуру: множество ветвей, соединенных в общих граничных точках — узлах, называемое *графом* (ориентированным) *схемы*.

Часть графа (подмножество его ветвей) называется *подграфом*. Наиболее важные подграфы — дерево, дополнение дерева, сечение, путь и контур.

Дерево связного графа — это связной подграф, содержащий все узлы графа, но не содержащий контуров. При этом граф (подграф) называют связным, если между любой парой узлов существует непрерывная последовательность ветвей, или путь. Дополнение дерева — множество ветвей, которые дополняют дерево до исходного графа; ветви дополнения дерева называют ветвями связи.

Множество ветвей графа, удаление которых делит граф на два связных подграфа, называют *сечением*. При этом одна из частей графа может быть, в частном случае, изолированным узлом. Для ветвей сечения справедлив первый закон Кирхгофа, так как удаление ветвей можно осуществить с помощью замкнутой поверхности, рассекающей ветви сечения.

С помощью дерева можно образовать главные сечения и главные контуры. **Контур** — замкнутый путь. Главным называют сечение, состоящее из ветвей связи и только одной ветви дерева. Главным контуром называют контур, образованный ветвями дерева и только одной ветвью связи.

Если граф содержит n_B ветвей и n_U узлов, то количество ветвей дерева $n_D = n_U - 1$, количество ветвей связи $n_{CB} = n_B - n_D = n_B - n_U + 1$. Главные сечения и контуры являются независимыми, так как отличаются друг от друга по крайней мере одной ветвью.

Количество независимых сечений (контуров) определяет соответственно количество независимых уравнений, составляемых по первому $n_D - 1$ (второму $n_B - n_U + 1$) закону Кирхгофа.

Различают еще канонические сечения, образуемые ветвями, соединенными в одном узле. Уравне-

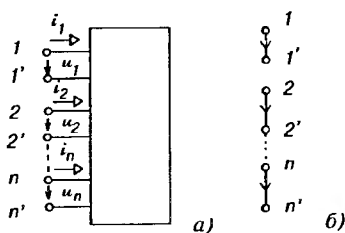


Рис. 3. 9

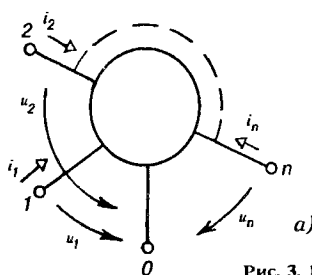


Рис. 3. 10

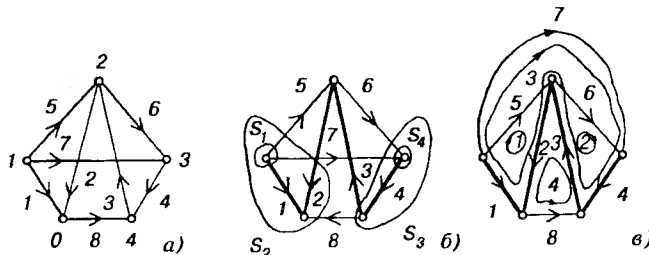


Рис. 3. 11

ние Кирхгофа для канонического сечения совпадает с уравнением для узла.

На рис. 3.11, а приведен граф, одно из деревьев которого (ветви 1—2—3—4) и главные сечения показаны на рис. 3.11, б. Сечениям соответствуют замкнутые поверхности, следы которых $S_1 - S_4$ изображены на рис. 3.11, в; в эти сечения входят ветви 1—5—7, 2—5—7—8, 3—6—7—8 и 4—6—7. Выбранному дереву соответствуют главные контуры 1—4, приведенные на рис. 3.11, в (ветви этих контуров 1—2—5, 3—4—6, 1—2—3—4—7, 2—3—8).

Если граф можно изобразить на плоскости без пересечений ветвей (см. рис. 3.11, а и 3.11, в), то он называется планарным. Для планарного графа можно выбрать канонические контуры — ближайшие соседние ячейки графа (контуры 1, 2, 4 и контур с ветвями 5—6—7 на рис. 3.11, в).

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ

Информация о структуре электрической цепи, наглядное представление о которой дает ориентированный граф, может быть представлена с помощью топологических матриц.

Узловая матрица А. Строки этой матрицы соответствуют узлам, а столбцы — ветвям; элемент матрицы $a_{ij} = 1 (-1)$, если ветвь j присоединена к узлу i и направлена от узла (к узлу); $a_{ij} = 0$, если ветвь j не присоединена к узлу i . Обычно матрица А составляется для всех узлов, кроме базисного, потенциал которого принимается (произвольно) равным нулю. Например, для графа на рис. 3.11, а при базисном узле 0 матрица А имеет вид:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Из определения этой матрицы следует, что она

представляет собой таблицу коэффициентов уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов. Поэтому произведение

$$A \mathbf{i} = 0,$$

где $\mathbf{i} = \begin{vmatrix} i_1 & i_2 & \dots & i_{n_B} \end{vmatrix}^T$ — столбцовая матрица (вектор) токов всех n_B ветвей (индекс «Т» означает транспонирование матрицы), выражает первый закон Кирхгофа в матричной форме. Справедливо также равенство (узловое преобразование)

$$A^T \varphi = \mathbf{u},$$

где

$$\varphi = \begin{vmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & \dots & \varphi_{n_U-1} \end{vmatrix}^T;$$

$$\mathbf{u} = \begin{vmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_{n_B} \end{vmatrix}^T$$

— соответственно вектор узловых потенциалов всех узлов, кроме базисного, и вектор напряжений ветвей. Это преобразование приводит к записи напряжений всех ветвей в виде разности потенциалов соответствующих узлов.

Матрица сечений Q. Строки этой матрицы соответствуют сечениям, а столбцы — ветвям; элемент матрицы $q_{ij} = +1 (-1)$, если ветвь j содержится в сечении i (т.е. пересекается поверхностью S_i) и ее направление совпадает (противоположно) с направлением сечения (поверхности S_i); элемент $q_{ij} = 0$, если ветвь i не принадлежит сечению j . Как правило, матрица Q составляется для главных сечений. Эта матрица представляет собой таблицу коэффициентов уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для сечений, т.е. справедливо матричное уравнение

$$Q \mathbf{i} = 0.$$

Кроме того, с помощью матрицы Q напряжение

каждой ветви можно выразить как линейную комбинацию напряжений ветвей дерева

$$\mathbf{u} = \mathbf{Q}^T \mathbf{u}^D,$$

где $\mathbf{u}^D$ — вектор напряжений ветвей дерева; в рассматриваемом примере

$$\mathbf{u}^D = \parallel u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \parallel^T.$$

Соотношение $\mathbf{u} = \mathbf{Q}^T \mathbf{u}^D$ называют преобразованием узловых пар.

Если матрица $\mathbf{Q}$ составлена для главных сечений, то ее первые столбцы, соответствующие ветвям дерева, образуют единичную подматрицу, порядок которой равен $n_D = n_Y - 1$.

Матрица контуров $\mathbf{B}$. Строки этой матрицы соответствуют контурам, а столбцы — ветвям. Ее элемент $b_{ij} = +1$ (-1), если ветвь j входит в контур i и ее направление совпадает (противоположно) с направлением обхода контура; $b_{ij} = 0$, если ветвь j не содержится в контуре i . Как правило, матрицу $\mathbf{B}$ составляют для главных контуров.

По определению $\mathbf{B}$ — матрица коэффициентов уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Поэтому этот закон в матричной форме записывается как

$$\mathbf{B} \mathbf{u} = 0.$$

Кроме того, справедливо соотношение (контурное преобразование)

$$\mathbf{i} = \mathbf{B}^T \mathbf{i}^K,$$

где $\mathbf{i}^K$ — вектор некоторых фиктивных токов, называемых контурными (вектор контурных токов).

Полагают, что контурные токи замыкаются по ветвям контура; например, на рис. 3.11, в направления обхода контуров можно считать положительными направлениями контурных токов. При этом через каждую ветвь может замыкаться один или несколько контурных токов; ток ветви равен линейной комбинации контурных токов, что и выражает равенство $\mathbf{i} = \mathbf{B}^T \mathbf{i}^K$.

Если матрица $\mathbf{B}$ составлена для главных контуров, то ее последние столбцы, соответствующие ветвям связи, образуют единичную подматрицу порядка $n_{CB} = n_B - n_Y + 1$.

Топологические матрицы связаны соотношениями

$$\mathbf{A} \mathbf{B}^T = 0, \mathbf{B} \mathbf{A}^T = 0; \mathbf{Q} \mathbf{B}^T = 0, \mathbf{B} \mathbf{Q}^T = 0.$$

Выше уравнения Кирхгофа в матричной форме, узловое, контурное преобразования и преобразования узловых пар записаны для мгновенных значений токов и напряжений ветвей. При гармонических напряжениях и токах справедливы аналогичные уравнения и преобразования для комплексных амплитуд (действующих значений):

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{I}} = 0, \mathbf{A}^T \dot{\varphi} = \dot{\mathbf{U}};$$

$$\mathbf{B} \dot{\mathbf{U}} = 0, \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{i}}^K = \dot{\mathbf{i}}$$

и т.д. Здесь $\dot{\mathbf{I}}$, $\dot{\mathbf{U}}$ — векторы комплексных действующих значений токов и напряжений ветвей; $\dot{\varphi}$, $\dot{\mathbf{i}}^K$ — векторы комплексных действующих значений узловых потенциалов и контурных токов.

При периодических несинусоидальных токах и напряжениях справедливы аналогичные соотноше-

ния для комплексных переменных, отображающих каждую гармоническую составляющую.

3.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

КОМПОНЕНТНЫЕ УРАВНЕНИЯ В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

При гармонических токах и напряжениях расчет цепей при установившемся режиме производится в комплексной форме, т. е. с использованием комплексных действующих значений (комплексных амплитуд) токов и напряжений, а также комплексных сопротивлений $\underline{Z}$ и проводимостей $\underline{Y}$. Для расчета составляется система уравнений, объединяющая компонентные и топологические уравнения, или система, получаемая после преобразований этих уравнений.

Примеры комплексных сопротивлений и проводимостей для схемных элементов приведены выше. В общем случае (рис. 3.12, а) при последовательном соединении резистивного, индуктивного и емкостного элементов комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + jX,$$

где R — активное сопротивление; $X = X_L - X_C =$

$$= \omega L - \frac{1}{\omega C} \text{ — реактивное сопротивление.}$$

При этом комплексная проводимость

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G - jB,$$

где G — активная, B — реактивная проводимости.

Комплексное сопротивление и проводимость можно представить в другом виде

$$\underline{Z} = z e^{j\varphi}; \underline{Y} = y e^{j\varphi};$$

$$z = |\underline{Z}|; \varphi = \arg \underline{Z}; y = |\underline{Y}|.$$

Очевидно, что

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}; y = \sqrt{G^2 + B^2}; \varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Если в данной ветви $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$, $\dot{U} = U e^{j\psi_u}$, то

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = z e^{j\varphi},$$

откуда $z = U/I$; $\varphi = \psi_u - \psi_i$ — угол сдвига фаз напряжения и тока.

При параллельном соединении резистивного, индуктивного и емкостного элементов (рис. 3.12, б)

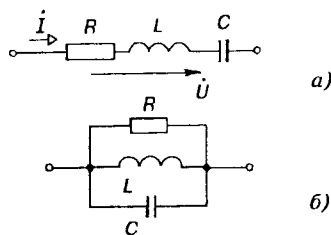


Рис. 3.12

комплексная проводимость

$$\underline{Y} = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = G - jB,$$

где $G = 1/R$, $B = B_L - B_C = \frac{1}{\omega L} - \omega C$ — соответственно активная и реактивная проводимость. При этом комплексное сопротивление $\underline{Z} = 1/\underline{Y}$.

Для обобщенного двухполюсника (обобщенной ветви), приведенного на рис. 3.13, справедливо уравнение

$$\dot{U}_j = \underline{Z}_j (\dot{I}_j + \dot{J}_j) - \dot{E}_j$$

или

$$\dot{I}_j = \underline{Y}_j (\dot{U}_j + \dot{E}_j) - \dot{J}_j,$$

где $\underline{Y}_j = 1/\underline{Z}_j$.

Это уравнение — обобщенный закон Ома. В частных случаях отдельные элементы этой ветви ($\underline{Z}$, $\dot{E}$, $\dot{J}$) могут отсутствовать.

Схема цепи может содержать также многополюсные элементы (см. рис. 3.9, а и 3.10, а). Если они не содержат независимых источников энергии, то для них справедливы уравнения в комплексной форме:

$$\dot{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{Z}} \dot{\mathbf{I}}, \dot{\mathbf{I}} = \underline{\mathbf{Y}} \dot{\mathbf{U}},$$

где $\dot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{I}}$ — векторы комплексных напряжений и токов всех пар зажимов многополюсника, т. е.

$$\dot{\mathbf{U}} = \left\| \begin{matrix} \dot{U}_1 & \dot{U}_2 & \dots & \dot{U}_n \end{matrix} \right\|^T;$$

$$\dot{\mathbf{I}} = \left\| \begin{matrix} \dot{I}_1 & \dot{I}_2 & \dots & \dot{I}_n \end{matrix} \right\|^T,$$

где $\underline{\mathbf{Z}}$, $\underline{\mathbf{Y}}$ — квадратные матрицы сопротивлений и проводимостей (комплексных), причем $\underline{\mathbf{Z}} = \underline{\mathbf{Y}}^{-1}$, $\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{Z}}^{-1}$.

Диагональные элементы матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$ (или $\underline{\mathbf{Y}}$) представляют собой входные сопротивления (или проводимости) каждой пары зажимов, внедиагональные элементы — взаимные (передаточные) сопротивления (или проводимости).

Если из матричного уравнения $\dot{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{Z}} \dot{\mathbf{I}}$ выписать j -е скалярное уравнение (для j -й пары зажимов

$$\dot{U}_j = \underline{Z}_{j1} \dot{I}_1 + \underline{Z}_{j2} \dot{I}_2 + \dots + \underline{Z}_{jj} \dot{I}_j + \dots + \underline{Z}_{jn} \dot{I}_n,$$

то диагональный элемент $\underline{Z}_{jj} = \dot{U}_j / \dot{I}_j$, при $\dot{I}_k = 0$, $k = 1, \dots, n$, $k \neq j$. Внедиагональный элемент $\underline{Z}_{jl} = \dot{U}_j / \dot{I}_l$, при $\dot{I}_k = 0$, $k = 1, \dots, n$, $k \neq l$. Таким образом, элементы матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$ определяются при условии, что все пары зажимов разомкнуты, кроме одной (j или l).

Элементы $\underline{Y}_{jj}$, $\underline{Y}_{jl}$ матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$ определяются аналогично, но при условии, что все пары зажимов короткозамкнуты, кроме одной (j или l).

В общем случае матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$ и $\underline{\mathbf{Y}}$ могут не существовать. Тогда многополюсник характеризуется более общей матрицей гибридных параметров $\underline{\mathbf{H}}$, определяемой уравнением

$$\left\| \begin{matrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{matrix} \right\| = \underline{\mathbf{H}} \left\| \begin{matrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{matrix} \right\| =$$

$$= \left\| \begin{matrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{matrix} \right\|,$$

где $\dot{U}_1$, $\dot{I}_1$ (или $\dot{U}_2$, $\dot{I}_2$) — векторы напряжений и токов первого (или второго) подмножества пар зажимов; эти подмножества могут выбираться произвольно из множества всех n пар зажимов.

Элементы подматриц $\underline{\mathbf{H}}_{11}$ ($\underline{\mathbf{H}}_{22}$) представляют собой входные и передаточные сопротивления (проводимости), элементы подматриц $\underline{\mathbf{H}}_{12}$ ($\underline{\mathbf{H}}_{21}$) — коэффициенты передачи напряжений (токов) соответствующих пар зажимов многополюсника.

Если многополюсник содержит независимые источники, то его уравнения записываются в виде

$$\dot{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{Z}} \dot{\mathbf{I}} + \dot{\mathbf{U}}_p,$$

$$\dot{\mathbf{I}} = \underline{\mathbf{Y}} \dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{I}}_k,$$

где $\dot{\mathbf{U}}_p$ ($\dot{\mathbf{I}}_k$) — вектор напряжений многополюсника при разомкнутых зажимах (вектор токов при замкнутых зажимах). Аналогично обобщается уравнение с гибридной матрицей.

В частном случае в виде многополюсника можно рассматривать индуктивно связанные ветви. При этом диагональные элементы матрицы сопротивлений равны $\underline{Z}_{kk} = j\omega L_k$, внедиагональные $\underline{Z}_{kl} = \pm j\omega M_{kl}$.

ПОЛНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЦЕПИ

Если схема содержит n_1 двухполюсников и n_2 многополюсников, то для нее справедливо матричное компонентное уравнение

$$\dot{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{Z}} (\dot{\mathbf{I}} + \dot{\mathbf{J}}) - \dot{\mathbf{E}}$$

или

$$\dot{\mathbf{I}} = \underline{\mathbf{Y}} (\dot{\mathbf{U}} + \dot{\mathbf{E}}) - \dot{\mathbf{J}}.$$

Здесь $\dot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{I}}$ — векторы напряжений и токов двухполюсников и пар зажимов многополюсников; $\dot{\mathbf{E}}$, $\dot{\mathbf{J}}$ — векторы ЭДС источников ЭДС и токов источников токов двухполюсников (см. рис. 3.13), а также напряжений $\dot{\mathbf{U}}_p$ и токов $\dot{\mathbf{I}}_k$ многополюсников, содержащих независимые источники энергии; $\underline{\mathbf{Z}}$ и $\underline{\mathbf{Y}}$ — квазидиагональные матрицы сопротивлений и проводимостей двухполюсников и многополюсников:

$$\underline{\mathbf{Z}} = \text{diag} (\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \dots, \underline{Z}_{n_1}; \underline{Z}^{(1)}, \underline{Z}^{(2)}, \dots, \underline{Z}^{(n_2)});$$

$$\underline{\mathbf{Y}} = \text{diag} (\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \dots, \underline{Y}_{n_1}; \underline{Y}^{(1)}, \underline{Y}^{(2)}, \dots, \underline{Y}^{(n_2)}),$$

где нижний (верхний) индекс у элементов матри-

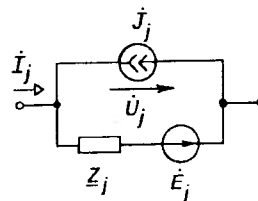


Рис. 3.13

цы соответствует параметрам двухполюсников (матрицам многополюсников). Записанная структура матриц $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$ справедлива, если первые номера присвоены ветвям графа, отображающим обобщенные двухполюсники, а последующие номера — ветвям графа каждого многополюсника поочередно.

Объединяя топологические уравнения для узлов и контуров с матричными компонентными уравнениями, получаем полную систему уравнений цепи:

$$\begin{pmatrix} \underline{A} & 0 \\ 0 & \underline{B} \\ -\underline{Z} & \underline{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\underline{I}} \\ \dot{\underline{U}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{Z} \dot{\underline{J}} - \underline{E} \end{pmatrix}$$

или

$$\begin{pmatrix} \underline{A} & 0 \\ 0 & \underline{B} \\ \underline{1} & -\underline{Y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\underline{I}} \\ \dot{\underline{U}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \underline{Y} \dot{\underline{E}} - \dot{\underline{J}} \end{pmatrix}$$

Решая эти системы уравнений, получаем комплексные значения напряжений и токов всех элементов цепи. По комплексным значениям напряжений и токов можно однозначно записать мгновенные значения. Приведенные уравнения легко формируются на ЭВМ, однако имеют большой порядок, равный удвоенной сумме всех ветвей графа.

УЗЛОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Число совместно решаемых уравнений можно сократить, если воспользоваться узловым преобразованием и уравнением по первому закону Кирхгофа. При этом получается матричное уравнение с узловыми потенциалами (узловое уравнение)

$$\underline{A} \underline{Y} \underline{A}^T \dot{\phi} = \underline{A} \dot{\underline{J}} - \underline{A} \underline{Y} \underline{E}$$

или

$$\underline{Y}^U \dot{\phi} = \dot{\underline{J}}^U,$$

где $\underline{Y}^U = \underline{A} \underline{Y} \underline{A}^T$ — матрица узловых проводимостей; $\dot{\underline{J}}^U = \underline{A} \dot{\underline{J}} - \underline{A} \underline{Y} \underline{E}$ — вектор узловых токов. Неизвестными переменными в полученном уравнении служат узловые потенциалы, рассчитав которые легко найти напряжения и токи всех элементов схемы.

Узловые уравнения легко формируются (в том числе и на ЭВМ) без операций умножения матриц. Если схема не содержит многополюсников и индуктивно связанных ветвей, то диагональный элемент $\underline{Y}_{jj}^U$ матрицы $\underline{Y}^U$ (собственная проводимость узла) равен сумме проводимостей двухполюсников, присоединенных к узлу j . Внедиагональный элемент $\underline{Y}_{jk}^U$ (взаимная проводимость узлов) равен суммарной проводимости ветвей, соединяющих узлы j и k , взятой с противоположным знаком. Элемент $\underline{J}_k^U$ вектора узловых токов равен алгебраической сумме токов источников тока $\underline{J}_j$, присоединенных к узлу k ; кроме того, элемент $\underline{J}_k^U$ учитывает составляющие $\underline{Y}_j \dot{E}_j$ от ЭДС $\dot{E}_j$ в тех ветвях, которые также присоединены к узлу k . При этом с положительным (отрицательным) знаком учиты-

ваются токи $\underline{J}_j$ и $\underline{Y}_j \dot{E}_j$, направленные от узла k (к узлу k).

В общем случае схема содержит и многополюсники (см. рис. 3.10, а), характеризуемые матрицей проводимостей $\underline{Y}(j)$. Если ни один зажим многополюсника не совпадает с базисным узлом, то матрица проводимостей должна быть записана для всех $n+1$ узлов. Такая матрица называется неопределенной и обладает следующими свойствами: сумма элементов каждого столбца и каждой строки равна нулю. Если один из зажимов многополюсника совпадает с базисным узлом, то в матрице $\underline{Y}(j)$ не записываются строка и столбец, соответствующие этому зажиму (определенная матрица проводимостей).

При наличии многополюсников вначале составляется матрица $\underline{Y}_1^U$ и определяется вектор $\underline{J}_1^U$, обусловленные только двухполюсниками. Далее к элементам матрицы $\underline{Y}_1^U$ последовательно прибавляются элементы матриц проводимостей каждого многополюсника: в клетку (j, j) матрицы $\underline{Y}_1^U$ прибавляются собственные проводимости многополюсников, если соответствующий зажим присоединен к узлу j схемы; в клетку (j, k) прибавляются соответствующие взаимные проводимости многополюсников. К вектору $\underline{J}_1^U$ прибавляются последовательно элементы векторов $\dot{\underline{I}}_k$ (токов короткозамкнутых зажимов многополюсника), рассматриваемые как токи источников. При наличии индуктивно связанных ветвей они рассматриваются как многополюсник и учитываются в матрице $\underline{Y}^U$.

КОНТУРНЫЕ УРАВНЕНИЯ

При использовании контурного преобразования и второго закона Кирхгофа получаем уравнение

$$\underline{B} \underline{Z} \underline{B}^T \dot{\underline{I}}^K = \underline{B} \dot{\underline{E}} - \underline{B} \underline{Z} \dot{\underline{J}}$$

или

$$\underline{Z}^K \dot{\underline{I}}^K = \dot{\underline{E}}^K,$$

где $\underline{Z}^K = \underline{B} \underline{Z} \underline{B}^T$ — матрица контурных сопротивлений; $\dot{\underline{E}}^K = \underline{B} \dot{\underline{E}} - \underline{B} \underline{Z} \dot{\underline{J}}$ — вектор контурных токов. Это уравнение с контурными токами (контурное уравнение).

Если схема не содержит многополюсных и индуктивно связанных элементов, то матрицы $\underline{Z}^K$ и вектор $\dot{\underline{E}}^K$ нетрудно представить без операций умножения матриц. Диагональный элемент $\underline{Z}_{jj}^K$ матрицы $\underline{Z}^K$ равен суммарному сопротивлению ветвей, входящих в контур j (собственное сопротивление контура). Внедиагональный элемент $\underline{Z}_{jk}^K$ (взаимное сопротивление контуров) равен сопротивлению ветви, общей для контуров j и k , и записывается со знаком «плюс» («минус»), если контурные токи $\dot{\underline{I}}_j^K$ и $\dot{\underline{I}}_k^K$ направлены в общей ветви одинаково (противоположно). Элемент $\dot{E}_l^K$ вектора контурных ЭДС равен алгебраической сумме ЭДС ветвей контура l ; кроме того, элемент $\dot{E}_l^K$ учиты-

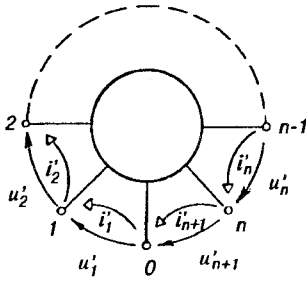


Рис. 3.14

вают составляющие $\underline{Z}_j \dot{J}_j$ в тех ветвях, которые входят в контур l . При этом с положительным (отрицательным) знаком учитываются ЭДС $\dot{E}_j$ и $\underline{Z}_j \dot{J}_j$, направления которых совпадают (противоположны) с направлением обхода контура.

При составлении контурных уравнений нетрудно непосредственно учесть взаимные индуктивности, алгебраически суммируя напряжения на катушках контура, обусловленные токами других контуров.

Если схема содержит многополюсники, характеризуемые матрицами $\underline{Z}^{(i)}$, то можно составить контурные уравнения, воспользовавшись формулами $\underline{Z}^K = \underline{B} \underline{Z} \underline{B}^T$, $\dot{E}^K = \underline{B} \dot{E} - \underline{B} \underline{Z} \underline{J}$. При составлении матриц $\underline{Z}^K$ и $\dot{E}^K$ без операций умножения матриц целесообразно перейти от токов и напряжений зажимов многополюсника (см. рис. 3.10, а) к токам и напряжениям «сторон» (рис. 3.14). Очевидно, что токи «сторон» в схеме, куда включен многополюсник, представляют собой контурные токи (с точностью до направления).

РАСШИРЕННЫЕ УЗЛОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Уравнения с однородными переменными (узловыми потенциалами и контурными токами) не универсальны по отношению к способу описания элементов схемы. Так, уравнения с узловыми потенциалами можно непосредственно, т. е. без преобразования схемы, составить, если ветви имеют конечные проводимости, а многополюсники — матрицы проводимостей. Таким условиям не удовлетворяют, например, идеальные источники ЭДС, короткозамкнутые управляющие ветви зависимых источников; из четырех типов зависимых источников (см. рис. 3.6, а—д) только у одного — источника тока, управляемого напряжением (см. рис. 3.6, в), существует матрица проводимостей. Аналогично уравнения с контурными токами можно непосредственно составить, если ветви имеют конечные сопротивления, а многополюсники — матрицы сопротивлений.

Большую универсальность, особенно при расчете электрических цепей с использованием ЭВМ, имеют расширенные узловые уравнения.

При составлении расширенных узловых уравнений все множество ветвей схемы делится на два подмножества: у-ветви, характеризующиеся проводимостью, и z-ветви, характеризующиеся сопротивлением. На рис. 3.15 приведена обобщенная у-ветвь,

содержащая двухполюсник с проводимостью $\underline{Y}_i$, независимый источник тока $\dot{J}_i$ и зависимые ИТУН $\underline{Y}_{ij} \dot{U}_j$ и ИТУТ $K_{ik} \dot{I}_k$; ее уравнение

$$\dot{I}_i = \underline{Y}_i \dot{U}_i + \underline{Y}_{ij} \dot{U}_j + K_{ik} \dot{I}_k - \dot{J}_i.$$

Обобщенная z-ветвь изображена на рис. 3.16; она содержит двухполюсник с сопротивлением $\underline{Z}_l$, независимый источник ЭДС $\dot{E}_l$ и зависимые ИНУТ $\underline{Z}_{lm} \dot{I}_m$ и ИНУН $\underline{N}_{ln} \dot{U}_n$; ее уравнение

$$\dot{U}_l = \underline{Z}_l \dot{I}_l + \underline{Z}_{lm} \dot{I}_m + \underline{N}_{ln} \dot{U}_n - \dot{E}_l.$$

Объединяя эти уравнения для всех у- и z-ветвей, получаем матричные уравнения

$$\dot{\mathbf{I}}_Y = \underline{\mathbf{Y}} \dot{\mathbf{U}}_Y + \underline{\mathbf{K}} \dot{\mathbf{I}}_Z - \dot{\mathbf{J}};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_Z = \underline{\mathbf{Z}} \dot{\mathbf{I}}_Z + \underline{\mathbf{N}} \dot{\mathbf{U}} - \dot{\mathbf{E}},$$

где $\dot{\mathbf{I}}_Y$, $\dot{\mathbf{U}}_Y$, $\dot{\mathbf{I}}_Z$, $\dot{\mathbf{U}}_Z$, $\dot{\mathbf{J}}$, $\dot{\mathbf{E}}$ — матрицы-столбцы (векторы) токов, напряжений и ЭДС; $\underline{\mathbf{Y}}$ — матрица проводимости у-ветвей; $\underline{\mathbf{Z}}$ — матрица сопротивлений z-ветвей; $\underline{\mathbf{K}}$ — матрица параметров всех ИТУТ; $\underline{\mathbf{N}}$ — матрица параметров всех ИНУН.

Матричные уравнения записаны в предположении, что управляющими по току (по напряжению) служат z-ветви (у-ветви), которые в частном случае могут быть короткозамкнутыми (разомкнутыми). Параметры ИТУН учитываются в матрице $\underline{\mathbf{Y}}$, параметры ИНУТ — в матрице $\underline{\mathbf{Z}}$.

При делении всех ветвей на два подмножества матричное уравнение по первому закону Кирхгофа имеет вид:

$$\underline{\mathbf{A}}_Y \dot{\mathbf{I}}_Y + \underline{\mathbf{A}}_Z \dot{\mathbf{I}}_Z = 0,$$

где $\underline{\mathbf{A}}_Y$, $\underline{\mathbf{A}}_Z$ — подматрицы узловой матрицы $\underline{\mathbf{A}}$, соответствующие у- и z-ветвям.

Подставляя последнее соотношение в матричные уравнения и учитывая равенства

$$\dot{\mathbf{U}}_Y = \underline{\mathbf{A}}_Y^T \dot{\Phi}, \quad \dot{\mathbf{U}}_Z = \underline{\mathbf{A}}_Z^T \dot{\Phi},$$

получаем расширенное узловое уравнение (в матричной форме):

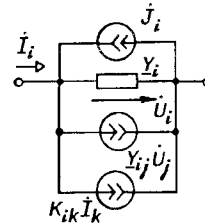


Рис. 3.15

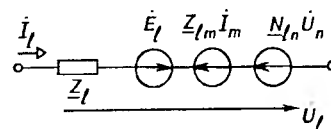


Рис. 3.16

$$\begin{aligned} \left\| \begin{array}{cc} A_Y Y A_Y^T & A_Y K + A_Z \\ N A_Y^T - A_Z^T & Z \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} \dot{\varphi} \\ \dot{I}_Z \end{array} \right\| = \\ = \left\| \begin{array}{c} A_Y J \\ E \end{array} \right\| \end{aligned}$$

В отличие от обычных уравнений с узловыми потенциалами переменными в расширенном уравнении служат не только потенциалы узлов, но и токи z -ветвей. В частном случае, когда все ветви схемы можно рассматривать как y -ветви, это уравнение становится обычным уравнением с узловыми потенциалами.

Расширенное уравнение просто формируется на ЭВМ без выполнения операций умножения матриц.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Потенциал каждой точки электрической цепи может быть представлен соответствующей точкой на комплексной плоскости, так что разность потенциалов между какими-либо двумя точками a и b цепи выражается вектором, соединяющим две точки на плоскости. При этом вектор $\dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b = \dot{U}_{ab}$ строится по обычному правилу вычитания векторов. Его началом является точка b , концом (стрелка) — точка a .

Совокупность векторов напряжений и ЭДС, построенных на комплексной плоскости по этим правилам, образует топографическую диаграмму.

Пример. См. схему на рис. 3.17 и топографическую диаграмму на рис. 3.18

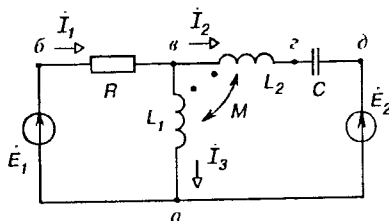


Рис. 3.17

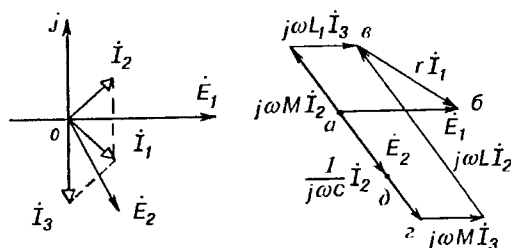


Рис. 3.18

ОСОБЕННОСТИ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ

Уравнения для расчета линейных цепей при установившемся режиме рассмотрены для случая гармонических ЭДС и токов одинаковой частоты. Если линейная цепь содержит только источники постоянных ЭДС и токов, то все напряжения и токи будут также постоянны. В этом случае схема состоит (кроме источников) только из резистивных двухполюсников и многополюсников с вещественными матрицами сопротивлений, проводимостей или гибридных параметров. Все уравнения, записанные выше, будут иметь вещественные элементы в матрице коэффициентов и в векторе правой части; искомые переменные также будут вещественными.

При несинусоидальных периодических ЭДС и токах источников они могут быть представлены конечным рядом Фурье, т.е. параметр каждого источника следует рассматривать как сумму нескольких воздействий. Для линейных цепей реакция на несколько воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие в отдельности. Поэтому при несинусоидальном периодическом воздействии расчет цепи содержит следующие этапы.

1. Сопротивления индуктивных и проводимости емкостных элементов считаются нулевыми, т.е. индуктивные ветви замыкаются, емкостные размыкаются. Производится расчет схемы с постоянными ЭДС и токами и резистивными элементами.

2. Формируется и решается система уравнений с комплексными коэффициентами для каждой гармонической составляющей ($\omega_1, 2\omega_1, 3\omega_1$ и т.д.). При этом изменяются параметры источников и комплексные сопротивления индуктивных и емкостных элементов.

3. От комплексных изображений переменных, соответствующих каждой гармонике, переходят к мгновенным значениям, т.е. функциям времени, которые суммируют для получения результата во временной области.

Пример. Определим ток в неразветвленной цепи, состоящей из резистивного, индуктивного и емкостного элементов (характеризуемых соответственно параметрами $R = 5$ Ом, $L = 1$ мГ и $C = 1$ мкФ), а также несинусоидальной ЭДС

$$e = 100 \sin \omega t + 10 (\sin 3 \omega t + \sin 5 \omega t) \text{ В,}$$

при основной частоте $f_1 = 10^3$ Гц.

Для первой гармоники

$$X_{1L} = 2\pi f_1 L = 6,3 \text{ Ом;}$$

$$X_{1C} = \frac{1}{2\pi f_1 C} = 159,3 \text{ Ом,}$$

поэтому комплексная амплитуда тока

$$\dot{I}_{1m} = \frac{100}{5 + j(6,3 - 159,3)} \approx 0,7 e^{j\pi/2} \text{ А}$$

определяется в основном емкостным сопротивлением. Для третьей гармоники

$$X_{3L} = 2\pi \cdot 3f_1 L = 18,8 \text{ Ом};$$

$$X_{3C} = \frac{1}{2\pi \cdot 3f_1 C} = 53,1 \text{ Ом};$$

$$i_{3m} = \frac{10}{5 + j(18,8 - 53,1)} \approx 0,3e^{j\pi/2} \text{ А}.$$

Поскольку для пятой гармоники $X_{5L} = 31,5 \text{ Ом}$, $X_{5C} = 31,9 \text{ Ом}$, ток i_{5m} определяется в основном сопротивлением R :

$$i_{5m} = \frac{10}{5 + j(31,5 - 31,9)} \approx 2 \text{ А}.$$

Переходя к мгновенным значениям гармонических составляющих, получаем

$$i = i_1 + i_3 + i_5 = 0,7 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + 0,3 \sin(3\omega t + \frac{\pi}{2}) + 2 \sin 5\omega t \text{ А}.$$

РАСЧЕТ МОЩНОСТЕЙ

При синусоидальных напряжении и токе ветви мгновенная мощность (положительные направления u и i совпадают)

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

или

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \psi),$$

где $\varphi = \psi_u - \psi_i$, $\psi = \psi_u + \psi_i$.

Среднее значение мощности $p(t)$ за период называют активной мощностью

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos \varphi.$$

Полная мощность $S = UI$.

Коэффициент мощности $P/S = \cos \varphi$.

Реактивная (обменная) мощность $Q = UI \sin \varphi$.

При этом $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$; $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$.

Комплексная мощность

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U}^* \underline{I} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi.$$

В соответствии с законом сохранения энергии в схеме выполняется баланс мощностей:

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{пр}};$$

$$\sum Q_{\text{ист}} = \sum Q_{\text{пр}};$$

$$\sum \underline{S}_{\text{ист}} = \sum \underline{S}_{\text{пр}},$$

т. е. сумма мощностей источников энергии равна сумме мощностей приемников энергии.

При периодических несинусоидальных ЭДС и токах источников активная мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k,$$

где φ_k — фазовый сдвиг между напряжением и током k -й гармоники.

Полная мощность

$$S = UI = (U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots)^{1/2} \times (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2}.$$

Реактивная мощность

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Коэффициент мощности

$$\lambda = P/S.$$

3.4. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ

Поскольку линейные схемы описываются линейными уравнениями, то для них справедлив принцип наложения: реакция цепи на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие.

ПРИНЦИП КОМПЕНСАЦИИ

Любой участок цепи с напряжением $\dot{U}$ можно заменить источником ЭДС $E = U$; положительные направления $\dot{U}$ и E противоположны. Любой участок цепи с током $\dot{I}$ можно заменить источником тока $J = I$; положительные направления $\dot{I}$ и J одинаковы. При этом все напряжения и токи схемы не изменяются.

ПРИНЦИП ВЗАИМНОСТИ

Схема называется взаимной, если для двух различных ее режимов справедливо равенство

$$\sum_k \dot{U}_k^{(1)} \dot{I}_k^{(2)} = \sum_k \dot{U}_k^{(2)} \dot{I}_k^{(1)},$$

где верхние индексы означают первый и второй режимы.

Отсюда следует, что для взаимного многополюсника матрицы $\underline{Z}$ и $\underline{Y}$ симметричны, т. е.

$$\underline{Z} = \underline{Z}^T, \quad \underline{Y} = \underline{Y}^T,$$

а для гибридной матрицы справедливо соотношение

$$\left\| \begin{array}{cc} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} \underline{H}_{11}^T & -\underline{H}_{21}^T \\ -\underline{H}_{12}^T & \underline{H}_{22}^T \end{array} \right\|.$$

Из приведенного определения взаимных цепей также следует, что если в цепи действует один источник ЭДС E_1 (один источник тока J_1) в ветви 1 и он создает в ветви 2 ток $\dot{I}_2$ (напряжение $\dot{U}_2$), то при переносе этого источника ЭДС (тока) в ветвь 2 ток (напряжение) ветви 1 будет равен току $\dot{I}_2$ (напряжению $\dot{U}_2$).

Для взаимных схем симметричны матрицы узловых проводимостей и контурных сопротивлений

$$\underline{Y}^u = (\underline{Y}^u)^T, \quad \underline{Z}^k = (\underline{Z}^k)^T.$$

К невязимным элементам относятся, например, управляемые источники, поэтому схемы, содержащие управляемые источники, невязимны.

ТЕОРЕМА ОБ АКТИВНОМ ДВУХПОЛЮСНИКЕ

Любой активный двухполусник, т. е. цепь, содержащая источники энергии и пассивные элементы и рассматриваемая относительно двух (внешних) узлов — зажимов, может быть заменен эквивалентной схемой рис. 3.19, а или 3.19, б. В этой схеме ЭДС E равна напряжению U_x между внешними узлами при условии, что эти узлы разомкнуты; ток источника J равен току I_k в ветви с нулевым сопротивлением, присоединенной к внешним узлам. Сопротивление Z равно входному сопротивлению $Z_{вх}$ двухполусника относительно внешних узлов при условии, что все источники внутри двухполусника исключены. Проводимость $Y = 1/Z$ равна входной проводимости $Y_{вх} = 1/Z_{вх}$ двухполусника при том же условии.

Если к внешним зажимам двухполусника присоединена ветвь с сопротивлением Z_n (проводимостью Y_n), то ток в ней

$$I = E / (Z + Z_n),$$

а напряжение

$$U = J / (Y + Y_n).$$

ТЕОРЕМА ВАРИАЦИЙ

Если в линейной цепи сопротивление Z_j ветви j возросло на ΔZ_j , то приращения токов в ветвях j и h определяются из выражений:

$$\Delta I_j = - \frac{\Delta Z_j Y_{jj}}{1 + \Delta Z_j Y_{jj}} I_{j0};$$

$$\Delta I_h = - \frac{\Delta Z_j Y_{jh}}{1 + \Delta Z_j Y_{jj}} I_{h0},$$

где I_{j0} , I_{h0} токи в ветвях j и h при $\Delta Z_j = 0$; Y_{jj} и Y_{jh} — входная и взаимная проводимости при $\Delta Z_j = 0$.

Если проводимость Y_j ветви j изменяется на ΔY_j , то приращения напряжений ветвей j и h равны:

$$\Delta U_j = - \frac{\Delta Y_j Z_{jj}}{1 + \Delta Y_j Z_{jj}} U_{j0};$$

$$\Delta U_h = - \frac{\Delta Y_j Z_{jh}}{1 + \Delta Y_j Z_{jj}} U_{h0},$$

где U_{j0} , U_{h0} — напряжения на ветвях j и h ; Z_{jj} и Z_{jh} — входное и взаимное сопротивления (при $\Delta Y_j = 0$).

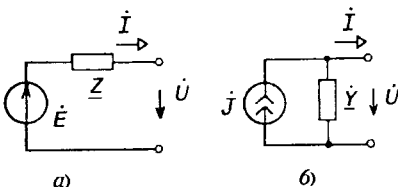


Рис. 3.19

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ

К простейшим преобразованиям относится замена последовательно соединенных сопротивлений $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ эквивалентным сопротивлением

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_m$$

или замена параллельно соединенных проводимостей $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ эквивалентной проводимостью

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_m.$$

Источник ЭДС с последовательно соединенным сопротивлением Z (см. рис. 3.19, а) может быть преобразован в эквивалентный источник тока с параллельной проводимостью Y (см. рис. 3.19, б) и наоборот. Параметры этих схем связаны соотношениями:

$$J = E/Z, \quad Y = 1/Z; \quad E = J/Y, \quad Z = 1/Y.$$

Решению уравнений с узловыми потенциалами путем последовательного исключения узловых потенциалов можно поставить в соответствие преобразование схемы — последовательное исключение узлов. Такое исключение в общем случае называется преобразованием многолучевой звезды (рис. 3.20, а) в полный многоугольник (рис. 3.20, б). Пассивные параметры многоугольника определяются по формулам:

$$Y_{jl} = Y_{lj} = \frac{Y_j Y_l}{\sum_k Y_k}; \quad j, l = 1 \dots m.$$

Активные параметры (ЭДС источников) многоугольника определяются неоднозначно. Можно включить источники ЭДС в любые из $m-1$ ветвей многоугольника. Если, например, включить источники ЭДС в каждую из $m-1$ ветвей многоугольника, имеющих общий узел j , то ЭДС

$$E_{jl} = \sum_{k=1}^m (E_l - E_k) \frac{Y_k}{Y_j},$$

$$l = 1 \dots m; \quad l \neq j.$$

Во всех ветвях, не соединенных с узлом j , источники ЭДС отсутствуют.

Аналогично преобразуется многолучевая звезда с источниками тока в ветвях. Исключая последовательно узлы, можно упростить исходную схему и рассчитать упрощенную. Для определения переменных в исходной схеме осуществляется поэтапный переход от простейшей схемы к более сложным.

Возможно преобразование трехлучевой звезды без источников (рис. 3.20, в) в треугольник (рис. 3.20, г). Сопротивления ветвей треугольника определяются:

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3};$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1};$$

$$Z_{31} = Z_3 + Z_1 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}.$$

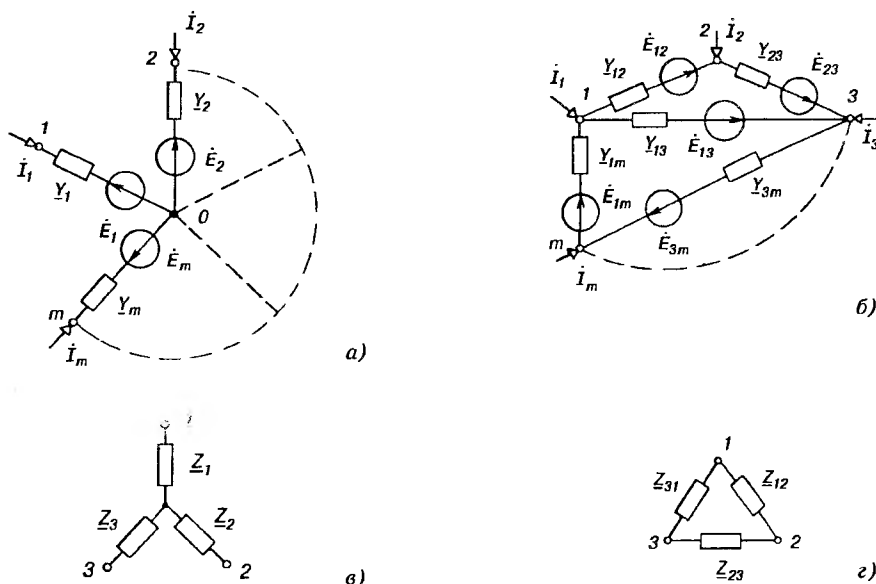


Рис. 3. 20

Возможно и обратное преобразование; сопротивления ветвей звезды выражаются в виде:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}; \\ Z_2 &= \frac{Z_{23} Z_{12}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}; \\ Z_3 &= \frac{Z_{31} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}. \end{aligned}$$

СИГНАЛЬНЫЕ ГРАФЫ

Любую систему линейных уравнений, описывающую режим линейной электрической цепи, можно наглядно изобразить в виде сигнального графа, который состоит из узлов и соединяющих узлы направленных ветвей. Узлы отображают зависимые переменные величины цепи (токи ветвей и напряжения на участках) и независимые (ЭДС и токи источников), ветви — коэффициенты при переменных в системе уравнений.

Для построения графа по системе уравнений каждая зависимая переменная представляется как функция всех других переменных (независимых и зависимых). Например, для схемы рис. 3.21 по методу узловых потенциалов при $\varphi_3 = 0$ составляются:

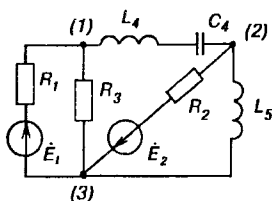


Рис. 3. 21

$$Y_{11} \varphi_1 + Y_{12} \varphi_2 = Y_1 E_1; \quad (3.1)$$

$$Y_{21} \varphi_1 + Y_{22} \varphi_2 = -Y_2 E_2, \quad (3.2)$$

где

$$Y_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)};$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)};$$

$$Y_{22} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j(\omega L_4 - 1/\omega C_4)} + \frac{1}{j\omega L_5};$$

$$Y_1 = \frac{1}{R_1}; \quad Y_2 = \frac{1}{R_2}.$$

Из уравнения (3.1) определяется потенциал φ_1 первого узла, а из уравнения (3.2) — потенциал φ_2 второго:

$$\varphi_1 = a_{11} \dot{E}_1 + a_{12} \dot{\varphi}_2; \quad (3.3)$$

$$\varphi_2 = a_{22} \dot{E}_2 + a_{21} \dot{\varphi}_1, \quad (3.4)$$

где $a_{11} = Y_1/Y_{11}$; $a_{12} = -Y_{12}/Y_{11}$; $a_{21} = -Y_{21}/Y_{22}$; $a_{22} = -Y_2/Y_{22}$; здесь следует иметь в виду, что $a_{12} \neq a_{21}$.

Уравнения (3.1), (3.2) или (3.3), (3.4) содержат две зависимые (φ_1, φ_2) и две независимые ($\dot{E}_1, \dot{E}_2$) переменные. Поэтому граф имеет четыре узла (рис. 3.22, а). Ветвь соединяет соответствующие узлы, если коэффициент, который определяет передачу ветви, $a_{ik} \neq 0$, и направлена к узлу i . В общем случае граф имеет узлы-исток, к которым присоединены только выходящие ветви ($\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$), промежуточные узлы с входящими и выходящими ветвями (φ_1 и φ_2) и узлы-сток, к которым присоединены только входящие ветви. В сток можно преобразовать любой промежуточный

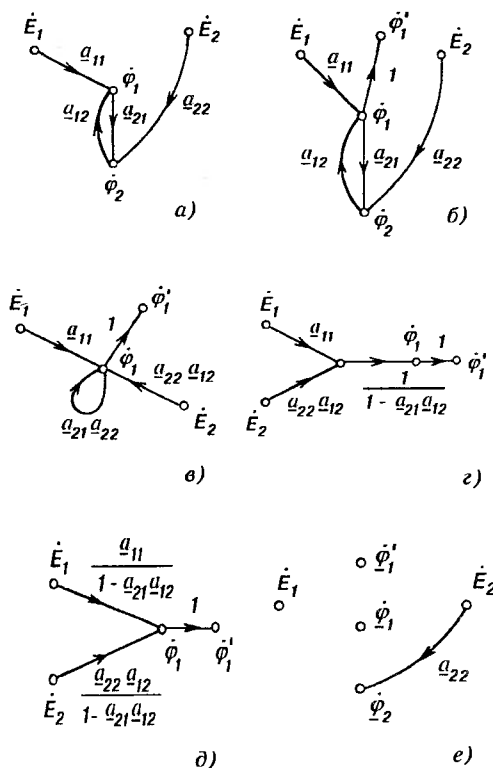


Рис. 3. 22

узел, добавляя ветвь с единичной передачей. Например, у графа рис. 3.22, б, эквивалентного графу рис. 3.22, а, есть сток $\dot{\varphi}_1' = \dot{\varphi}_1$.

Для определения искомой величины, например потенциала $\dot{\varphi}_1$, надо исключить из системы уравнений остальные зависимые переменные [из уравнений (3.1), (3.2) или (3.3), (3.4) потенциал $\dot{\varphi}_2$]. Исключению зависимой переменной соответствует основное преобразование графа — исключение промежуточного узла.

Правила исключения промежуточного узла в простейших графах показаны на рис. 3.23, а—г, где цифрами обозначены узлы и указаны значения передач ветвей до и после исключения. С применением этих правил исключен узел $\dot{\varphi}_2$ рис. 3.22, б и получен граф рис. 3.22, в.

На рис. 3.22, в и 3.23, г после исключения промежуточного графа получилась, в частности, ветвь-петля, входящая в тот же узел, из которого она выходит. На рис. 3.24, а—в показаны правила устранения промежуточного узла с петлей. Во втором случае сначала образуется дополнительный узел (5 на рис. 3.24, б), который затем исключается.

Путем применения этих правил получен граф рис. 3.22, г. После исключения дополнительного узла (рис. 3.22, д) можно определить искомый потенциал

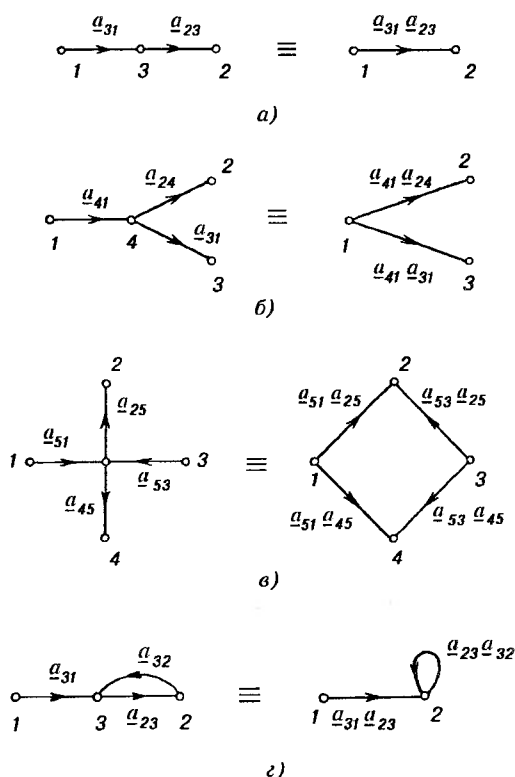


Рис. 3. 23

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_1' = \frac{a_{11}}{1 - a_{21} a_{12}} \dot{E}_1 + \frac{a_{22} a_{12}}{1 - a_{21} a_{12}} \dot{E}_2.$$

На рис. 3.25, а—г показан еще ряд правил преобразования графа.

Для графа с одним истоком и одним стоком передача (передаточная функция) между ними может быть определена по топологической формуле Мэсона. Применение этой формулы требует введения для графа следующих понятий: 1) путь (направленный) — непрерывная последовательность ветвей графа между какими-либо двумя узлами при условии, что начальный узел каждой ветви (кроме первой) совпадает с конечным узлом предыдущей ветви, причем каждый узел и ветвь в этой последовательности встречаются один раз; 2) прямой путь — путь, начинающийся в истоке и заканчивающийся в стоке; 3) передача прямого пути Π_k — произведение передач всех ветвей этого пути; 4) контур — замкнутый путь, т. е. начинающийся и заканчивающийся в одном и том же узле; 5) передача контура $\underline{L}_k$ произведение передач ветвей этого контура (в частном случае контур может состоять из одной ветви-петли); 6) определитель графа Δ — определитель системы уравнений, отображаемых графом; 7) минор прямого пути $\underline{\Delta}_k$ — определитель графа, получающегося после исключения всех ветвей k -го прямого пути и ветвей, имеющих с этим путем общие узлы

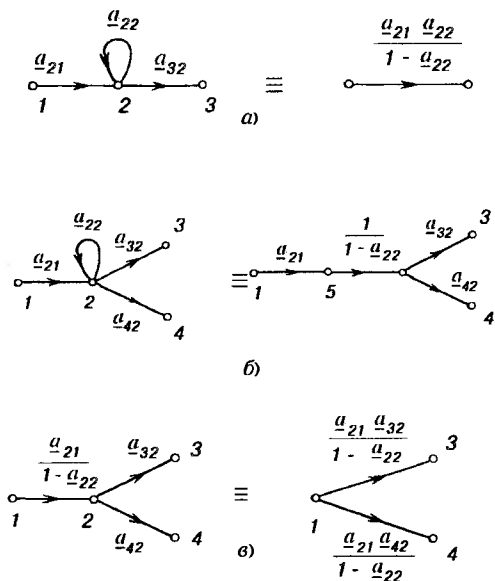


Рис. 3. 24

(определитель той части исходного графа, которая не соприкасается с k -м прямым путем).

Передача ветви определяется

$$\underline{H} = \frac{\sum_k \underline{P}_k \underline{\Delta}_k}{\underline{\Delta}},$$

где суммирование должно быть выполнено по всем прямым путям:

$$\underline{\Delta} = 1 - \sum_k \underline{P}_k^{(1)} + \sum_k \underline{P}_k^{(2)} - \sum_k \underline{P}_k^{(3)} + \dots; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = \sum_k \underline{L}_k$$

— сумма передач всех контуров графа; $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = \sum_k \underline{L}_{k1} \underline{L}_{k2} \dots \underline{L}_{ki}$ — сумма произ-

ведений передач всех возможных комбинаций из i некасающихся контуров ($i = 2, 3 \dots$); миноры $\underline{\Delta}_k$ вычисляются по той же формуле, что и $\underline{\Delta}$.

Если граф имеет несколько истоков (независимых переменных), то для определения зависимой переменной нужно применить метод наложения.

П р и м е р. Для графа рис. 3.22, б определить передачу $\underline{H}$ между истоком $\dot{E}_1$ и стоком $\dot{\varphi}_1$.

Контур один (состоящий из ветвей с передачами $\underline{a}_{12}$ и $\underline{a}_{21}$), т. е. $k = 1$. Следовательно,

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0 \text{ при } i > 1,$$

так как контур один, и $\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}$. Передача прямого пути $\underline{P}_k = \underline{P}_1 = \underline{a}_{11} \cdot 1$. После исключения прямого пути между узлами $\dot{E}_1$ и $\dot{\varphi}_1$, т. е. ветвей с передачами $\underline{a}_{11}$ и 1 и ветвей (с передачами

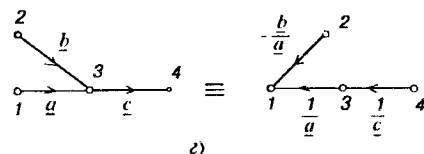
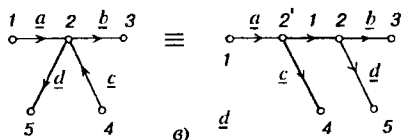
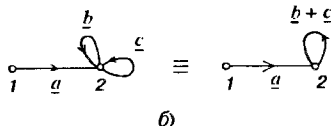
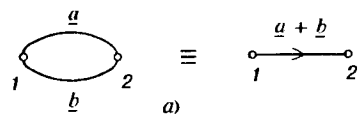


Рис. 3. 25

$\underline{a}_{21}$ и $\underline{a}_{12}$), имеющих с ним общий узел $\dot{\varphi}_1$, остается граф по рис. 3.22, е, для которого $\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = 0$ и $\sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0$, т. е. $\underline{\Delta}_k = \underline{\Delta}_1 = 1$. Передача между истоком $\dot{E}_1$ и стоком $\dot{\varphi}_1$:

$$\underline{H}_1 = \dot{\varphi}_1' / \dot{E}_1 = \underline{a}_{11} / (1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}).$$

Аналогично для передачи $\underline{H}_2$ между истоком $\dot{E}_2$ и стоком $\dot{\varphi}_1$

$$\sum_k \underline{P}_k^{(1)} = \underline{L}_1 = \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \sum_k \underline{P}_k^{(i)} = 0;$$

$$\underline{\Delta} = 1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}; \quad \underline{P}_1 = \underline{a}_{22} \underline{a}_{11} \cdot 1; \quad \underline{\Delta}_1 = 1,$$

т. е.

$$\underline{H}_2 = \dot{\varphi}_1' / \dot{E}_2 = \underline{a}_{22} \underline{a}_{12} / (1 - \underline{a}_{21} \underline{a}_{12}),$$

что совпадает с ранее полученным результатом.

3.5. РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПЕЙ

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Во многих случаях представляют интерес передаточные функции цепи $\underline{H}(j\omega)$, которые определяются как отношение комплексной амплитуды выходной переменной (напряжение, ток производной ветви) к комплексной амплитуде входной переменной (напряжение, ток источника сигнала). Комплексной передаточной функцией $\underline{H}(j\omega)$ соответствуют частотные характеристики:

амплитудно-частотная (АЧХ)

$$H(\omega) = |\underline{H}(j\omega)|,$$

фазочастотная (ФЧХ)

$$\theta(\omega) = \arg \underline{H}(j\omega).$$

Вместо АЧХ часто используют логарифмическую АЧХ или характеристику затухания

$$\alpha(\omega) = -20 \lg H(\omega)$$

а вместо ФЧХ — характеристику группового времени запаздывания (ХГВЗ)

$$\tau(\omega) = -d\theta(\omega)/d\omega.$$

Если, например, функция $H(\omega)$ постоянна в некотором диапазоне частот, а $\theta(\omega)$ — линейна, что соответствует постоянной функции $\tau(\omega)$, то в этом диапазоне входной сигнал передается на выход без искажений.

РЕЗОНАНСНЫЕ КОНТУРЫ

В последовательном R, L, C - контуре (рис. 3.26, а) передаточная функция напряжения

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_R}{\dot{U}_1} = \frac{j\omega \frac{R}{L}}{(j\omega)^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}$$

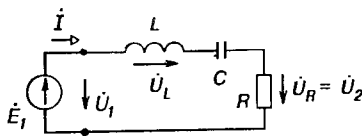
или

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{j\omega H_0 (\omega_0/Q)}{(j\omega)^2 + j\omega (\omega_0/Q) + \omega_0^2},$$

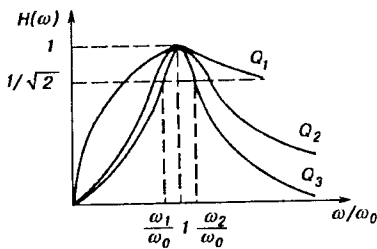
где

$$\omega_0^2 = 1/LC, R/L = \omega_0/Q, H_0 = 1,$$

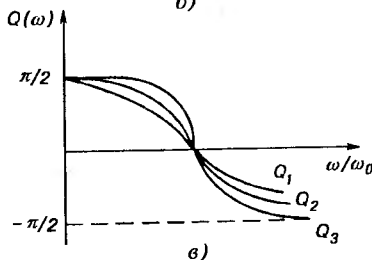
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$



а)



б)



в)

Рис. 3. 26

Частота ω_0 называемая резонансной частотой, определяется из условия

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

которое называют условием резонанса напряжений. При этом условии входное сопротивление является активным, ток I совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$, а напряжения $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ имеют одинаковую амплитуду, но противоположны по фазе и компенсируют друг друга.

Величина Q называется добротностью контура и характеризует отношение индуктивного $\dot{U}_L$ или емкостного $\dot{U}_C$ напряжения к напряжению $\dot{U}_R$ при резонансе.

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики определяются уравнениями:

$$H(\omega) = \frac{H_0 \omega \omega_0 / Q}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega \omega_0 / Q)^2}},$$

$$\theta(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega \omega_0 Q}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Графики АЧХ и ФЧХ приведены на рис. 3.26, б, в соответственно для разных значений Q ($Q_1 < Q_2 < Q_3$).

Рассматриваемую простую цепь можно использовать для выделения полезного сигнала в диапазоне частот $\omega_1 - \omega_2$, где ω_1 и ω_2 — граничные частоты. Этот диапазон частот называется полосой пропускания контура и обычно определяется по уровню АЧХ $H(\omega)/H(\omega_0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Для параллельного контура (рис. 3.27, а) условие резонанса стоков записывается в виде $B = 0$. Комплексная проводимость

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 + G_2 - j(B_1 + B_2),$$

где

$$G_1 = R_1/Z_1^2; G_2 = R_2/Z_2^2; B_1 = X_L/Z_1^2;$$

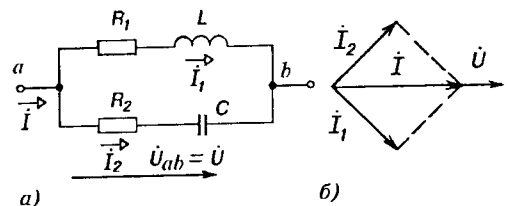
$$B_2 = -X_C/Z_2^2.$$

При резонансе

$$B = B_1 + B_2 = (X_L/Z_1^2) - (X_C/Z_2^2) = 0$$

и ток $\dot{I} = (G_1 + G_2) \dot{U}$ совпадает по фазе с напряжением (рис. 3.27, б). Резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{(\rho^2 - R_1^2)/(\rho^2 - R_2^2)},$$



а)

б)

Рис 3. 27

где $\rho = \sqrt{L/C}$. Резонанс можно получить изменяя не только частоту, но и параметры контура.

Если $R_1 = R_2 = \sqrt{L/C} = \rho$, то при любой частоте общий ток $\dot{I}$ совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$ (непрерывный резонанс).

3.6. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ И ФИЛЬТРЫ

УРАВНЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Для многополосников с двумя парами зажимов (четыреполосников) (рис. 3.28) записанные выше уравнения с матрицами $\underline{Z}$, $\underline{Y}$ и $\underline{H}$ приобретают вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix},$$

если четырехполосник не содержит независимых источников энергии. Для взаимного четырехполосника выполняются условия:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}, \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}, \underline{H}_{12} = -\underline{H}_{21}.$$

Кроме приведенных трех уравнений находят применение еще два:

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_1 \end{pmatrix} = \underline{G} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{G}_{11} & \underline{G}_{12} \\ \underline{G}_{21} & \underline{G}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \underline{A} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{pmatrix}.$$

Здесь $\underline{G}$ — матрица гибридных параметров, отличающаяся от $\underline{H}$ другим сочетанием гибридных переменных в левой и правой частях уравнения; $\underline{A}$ — цепочечная матрица. При выполнении условия взаимности

$$\underline{G}_{12} = -\underline{G}_{21}; \quad \underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \underline{A}_{21} = 1.$$

Смысл элементов каждой матрицы легко определяется из уравнений. Если, например, в последнем уравнении принять $\dot{I}_2 = 0$, то

$$\frac{1}{\underline{A}_{11}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \Big|_{\dot{I}_2 = 0}; \quad \frac{1}{\underline{A}_{21}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \Big|_{\dot{U}_2 = 0},$$

откуда следует, что $1/\underline{A}_{11}$ — коэффициент передачи напряжения; $1/\underline{A}_{21}$ — передаточное сопротивление при разомкнутых вторичных зажимах 2-2'.

Если $\dot{U}_2 = 0$, то

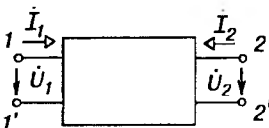


Рис. 3.28

$$\frac{1}{\underline{A}_{12}} = -\frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1} \Big|_{\dot{U}_2 = 0}; \quad \frac{1}{\underline{A}_{22}} = -\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \Big|_{\dot{U}_2 = 0},$$

Следовательно, $1/\underline{A}_{12}$ и $1/\underline{A}_{22}$ — соответственно передаточная проводимость и коэффициент передачи тока (взятые с обратным знаком) при короткозамкнутых вторичных зажимах.

Между элементами всех матриц четырехполосников (параметрами) можно установить соотношения, которые приведены в табл. 3.2.

Если четырехполосник содержит независимые источники энергии, в правой части уравнений добавляются векторы активных параметров, примеры которых приведены выше при рассмотрении многополосников.

Взаимные четырехполосники без внутренних независимых источников могут быть представлены Т- или П-образными схемами замещения (рис. 3.29, а, б). Для этих схем нетрудно найти элементы всех матриц. Например, для Т-образной схемы

$\underline{Z}$ -параметры:

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_3;$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3;$$

$\underline{Y}$ -параметры:

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\rho}; \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \underline{Z}_3/\rho;$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}{\rho},$$

где

$$\rho = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1;$$

$\underline{A}$ -параметры:

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{A}_{12} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2;$$

$$\underline{A}_{21} = 1/\underline{Z}_3; \quad \underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_3}.$$

Из этих уравнений можно определить параметры эквивалентной схемы. Если, в частности, известны $\underline{A}$ -параметры, то

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{21}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{A}_{22} - 1}{\underline{A}_{21}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{A}_{21}}.$$

Аналогично для П-образной схемы

$$\underline{Z}_{1,2} = \underline{A}_{12}; \quad \underline{Z}_{2,3} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11} - 1}; \quad \underline{Z}_{3,1} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22} - 1}.$$

Четырехполосник называется симметричным, если перемена местами первичных и вторичных зажимов не изменяет режима в цепи, в которую включен этот четырехполосник. У симметричного четырехполосника

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22}; \quad \underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{22}; \quad \underline{A}_{11} = \underline{A}_{22}.$$

В схемах замещения симметричных четырехполосников (см. рис. 3.29)

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 \text{ и } \underline{Z}_{1,2} = \underline{Z}_{2,3}.$$

Четырехполосники могут соединяться параллельно (рис. 3.30, а), последовательно (рис. 3.30, б), последовательно-параллельно (рис. 3.30, в), параллельно-последовательно (рис. 3.30, г). При

Т а б л и ц а 3.2. Связь параметров четырехполусника

Тип уравнения	Коэффициенты									
	<u>A</u>		<u>Y</u>		<u>Z</u>		<u>H</u>		<u>G</u>	
<u>A</u>	$\frac{A_{11}}{A_{21}}$	$\frac{A_{12}}{A_{22}}$	$-\frac{Y_{22}}{Y_{21}}$	$\frac{1}{Y_{21}}$	$\frac{Z_{11}}{Z_{21}}$	$-\frac{\Delta_Z}{Z_{21}}$	$-\frac{\Delta_H}{H_{21}}$	$\frac{H_{11}}{H_{21}}$	$\frac{1}{G_{21}}$	$-\frac{G_{22}}{G_{21}}$
	$\frac{A_{21}}{A_{22}}$	$\frac{A_{22}}{A_{22}}$	$\frac{\Delta_Y}{Y_{21}}$	$\frac{Y_{11}}{Y_{21}}$	$\frac{1}{Z_{21}}$	$-\frac{Z_{22}}{Z_{21}}$	$-\frac{H_{22}}{H_{21}}$	$\frac{1}{H_{21}}$	$\frac{G_{11}}{G_{21}}$	$-\frac{\Delta_G}{G_{21}}$
<u>Y</u>	$\frac{A_{22}}{A_{12}}$	$-\frac{\Delta_A}{A_{12}}$	Y_{11}	Y_{12}	$\frac{Z_{22}}{\Delta_Z}$	$-\frac{Z_{12}}{\Delta_Z}$	$\frac{1}{H_{11}}$	$-\frac{H_{12}}{H_{11}}$	$\frac{\Delta_G}{G_{22}}$	$\frac{G_{12}}{G_{22}}$
	$\frac{1}{A_{12}}$	$-\frac{A_{11}}{A_{12}}$	Y_{21}	Y_{22}	$-\frac{Z_{21}}{\Delta_Z}$	$\frac{Z_{11}}{\Delta_Z}$	$\frac{H_{21}}{H_{11}}$	$\frac{\Delta_H}{H_{11}}$	$-\frac{G_{21}}{G_{22}}$	$\frac{1}{G_{22}}$
<u>Z</u>	$\frac{A_{11}}{A_{21}}$	$-\frac{\Delta_A}{A_{21}}$	$\frac{Y_{22}}{\Delta_Y}$	$-\frac{Y_{12}}{\Delta_Y}$	Z_{11}	Z_{12}	$\frac{\Delta_H}{H_{22}}$	$\frac{H_{12}}{H_{22}}$	$\frac{1}{G_{11}}$	$-\frac{G_{12}}{G_{11}}$
	$\frac{1}{A_{21}}$	$-\frac{A_{22}}{A_{21}}$	$-\frac{Y_{21}}{\Delta_Y}$	$\frac{Y_{11}}{\Delta_Y}$	Z_{21}	Z_{22}	$-\frac{H_{21}}{H_{22}}$	$\frac{1}{H_{22}}$	$\frac{G_{21}}{G_{11}}$	$\frac{\Delta_G}{G_{11}}$
<u>H</u>	$\frac{A_{12}}{A_{22}}$	$\frac{\Delta_A}{A_{22}}$	$\frac{1}{Y_{11}}$	$-\frac{Y_{12}}{Y_{11}}$	$\frac{\Delta_Z}{Z_{22}}$	$\frac{Z_{12}}{Z_{22}}$	H_{11}	H_{12}	$\frac{G_{22}}{\Delta_G}$	$-\frac{G_{12}}{\Delta_G}$
	$\frac{1}{A_{22}}$	$-\frac{A_{21}}{A_{22}}$	$\frac{Y_{21}}{Y_{11}}$	$\frac{\Delta_Y}{Y_{11}}$	$-\frac{Z_{21}}{Z_{22}}$	$\frac{1}{Z_{22}}$	H_{21}	H_{22}	$-\frac{G_{21}}{\Delta_G}$	$\frac{G_{11}}{\Delta_G}$
<u>G</u>	$\frac{A_{21}}{A_{11}}$	$\frac{\Delta_A}{A_{11}}$	$\frac{\Delta_Y}{Y_{22}}$	$\frac{Y_{12}}{Y_{22}}$	$\frac{1}{Z_{11}}$	$-\frac{Z_{12}}{Z_{11}}$	$\frac{H_{22}}{\Delta_H}$	$-\frac{H_{12}}{\Delta_H}$	G_{11}	G_{12}
	$\frac{1}{A_{11}}$	$-\frac{A_{12}}{A_{11}}$	$-\frac{Y_{21}}{Y_{22}}$	$\frac{1}{Y_{22}}$	$\frac{Z_{21}}{Z_{11}}$	$\frac{\Delta_Z}{Z_{11}}$	$-\frac{H_{21}}{\Delta_H}$	$\frac{H_{11}}{\Delta_H}$	G_{21}	G_{22}

Здесь значения определителей:

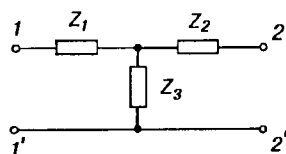
$$\Delta_A = A_{11} A_{22} - A_{21} A_{12} = -\frac{Z_{12}}{Z_{21}} = -\frac{Y_{12}}{Y_{21}} = \frac{H_{12}}{H_{21}} = \frac{G_{12}}{G_{21}};$$

$$\Delta_Y = \frac{A_{21}}{A_{12}} = Y_{11} Y_{22} - Y_{21} Y_{12} = \frac{1}{\Delta_Z} = \frac{H_{22}}{H_{11}} = \frac{G_{11}}{G_{22}};$$

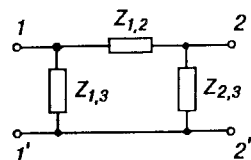
$$\Delta_Z = -\frac{A_{21}}{A_{21}} = \frac{1}{\Delta_Y} = Z_{11} Z_{22} - Z_{21} Z_{12} = \frac{H_{11}}{H_{22}} = \frac{G_{22}}{G_{11}};$$

$$\Delta_H = -\frac{A_{11}}{A_{22}} = \frac{Y_{22}}{Y_{11}} = \frac{Z_{11}}{Z_{22}} = \frac{H_{11} H_{22} - H_{21} H_{12}}{1} = \frac{1}{\Delta_G};$$

$$\Delta_G = -\frac{A_{22}}{A_{11}} = \frac{Y_{11}}{Y_{22}} = \frac{Z_{22}}{Z_{11}} = \frac{1}{\Delta_H} = G_{11} G_{22} - G_{21} G_{12}.$$



а)



б)

Рис. 3. 29

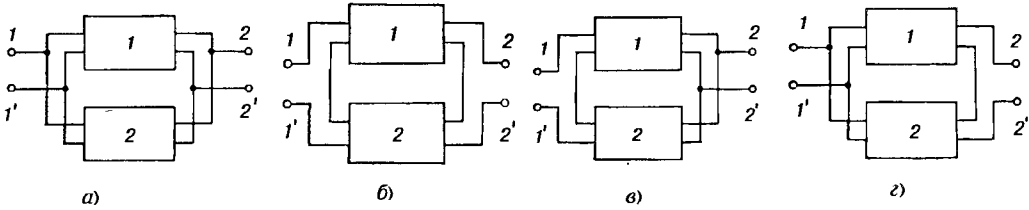


Рис. 3.30

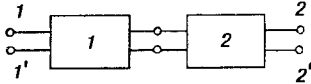


Рис. 3.31

таких соединениях суммируются соответственно матрицы (если соединение не нарушает уравнений каждого четырехполюсника):

$$\underline{Y} = \underline{Y}^{(1)} + \underline{Y}^{(2)}; \underline{Z} = \underline{Z}^{(1)} + \underline{Z}^{(2)};$$

$$\underline{H} = \underline{H}^{(1)} + \underline{H}^{(2)}; \underline{G} = \underline{G}^{(1)} + \underline{G}^{(2)},$$

где матрицы без индексов соответствуют результирующему четырехполюснику, матрицы с индексами (1) и (2) — четырехполюсникам 1 и 2.

Часто встречается каскадное соединение четырехполюсников (рис. 3.31). Результирующая цепочная матрица такого соединения

$$\underline{A} = \underline{A}^{(1)} \underline{A}^{(2)}.$$

Это соотношение является общим для любого числа каскадно соединенных четырехполюсников.

В общем случае расчет цепей, содержащих четырехполюсники, выполняется с помощью приведенных выше уравнений (узловых, контурных и расширенных узловых). В частных случаях можно использовать специфические особенности схемы.

ПАССИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Фильтры представляют собой четырехполюсники, предназначенные для выделения полезного сигнала в заданном диапазоне частот из смеси его с шумами. Обычно требования к фильтрам задаются как ограничения на характеристику затухания $\alpha(\omega)$. На рис. 3.32 в качестве примера приведены требования к характеристике затухания полосно-пропускающего фильтра (ППФ):

в полосе пропускания полезного сигнала затухание $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$; $\alpha(\omega) \leq \alpha_{\max}$;

в полосах задерживания $0 \leq \omega \leq \omega_3$ и $\omega_4 \leq \omega$ затухание $\alpha(\omega) \geq \alpha_{\min}$.

Диапазоны частот $\omega_3 \leq \omega \leq \omega_1$ и $\omega_2 \leq \omega \leq \omega_4$ называют переходными полосами, в которых затухание обычно монотонно возрастает. Применительно к ограничениям на характеристику затухания могут задаваться дополнительные требования к ФЧХ или ХГВЗ (обычно требуется близкая к линейной ФЧХ или близкая к постоянной ХГВЗ в полосе пропускания).

В идеальном случае в полосе пропускания $\alpha = 0$, в полосах задерживания $\alpha \rightarrow \infty$, переходные полосы отсутствуют. Кроме того, в идеальном

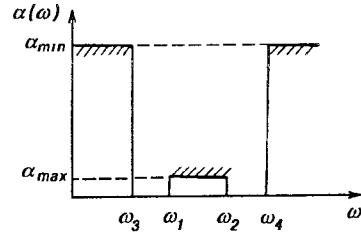


Рис. 3.32

случае в полосе пропускания ФЧХ должна быть линейной. Таким образом, идеальный ППФ в полосе пропускания не искажает полезный сигнал, а в полосах задерживания сигнал полностью подавляется.

Фильтр нижних частот (ФНЧ) и фильтр верхних частот (ФВЧ) можно рассматривать как частные случаи ППФ. Для ФНЧ отсутствует нижняя полоса задерживания и частота $\omega_1 = 0$; для ФВЧ отсутствуют верхняя полоса задерживания и частота ω_1 .

В зависимости от элементов, из которых строятся фильтры, они делятся на пассивные RLC, пассивные RC и активные RC. В последних используются электронные элементы.

Простейший пассивный RLC ППФ (второго порядка) приведен на рис. 3.26, а. Однако такой фильтр обычно не удовлетворяет заданным требованиям, и поэтому применяют более сложные фильтры. ППФ высокого порядка $n = 2m$ можно, в частности, получить, соединяя каскадно через развязывающие усилители (коэффициент усиления равен 1, входное сопротивление и выходная проводимость бесконечно велики) m четырехполюсников второго порядка. Так как из-за развязывающих усилителей четырехполюсники не будут влиять друг на друга, общая передаточная функция равна произведению передаточных функций второго порядка (см. выше):

$$\underline{H}(j\omega) = \prod_{i=1}^m \frac{j\omega H_{0i} \omega_{0i}' / Q_i}{(j\omega)^2 + j\omega \omega_{0i}' / Q_i + \omega_{0i}^2}.$$

Соответственно частотные характеристики определяются по формулам:

$$H(\omega) = \prod_i H_i(\omega); \alpha(\omega) = \sum_i \alpha_i(\omega);$$

$$\theta(\omega) = \sum_i \theta_i(\omega); \tau(\omega) = \sum_i \tau_i(\omega).$$

Если при $m = m_k$ характеристики не удовлет-

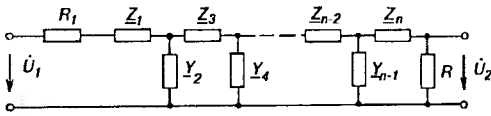


Рис. 3. 33

воряют заданным требованиям, то следует добавить еще звено ($m = m_k + 1 = m_k + 1$) и вновь рассчитать характеристики. Продолжая расчеты и сравнения, можно добиться заданных требований.

Пассивные RLC-фильтры высокого порядка реализуют без усилителей в виде общей лестничной структуры (рис. 3.33). Эта структура имеет резистивные элементы R_1 и R_2 на входе и выходе; «продольные» сопротивления $Z_1, Z_3, \dots, Z_n$ и «поперечные» проводимости $Y_2, Y_4, \dots, Y_{n-1}$ представляют собой реактивные двухполюсники. В зависимости от схем этих двухполюсников фильтр может пропускать нижние, верхние или другие частоты.

Параметры и схемы RLC-фильтров различных типов и порядков можно найти в справочниках по расчету фильтров.

3.7. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА С НЕЙТРАЛЬНЫМ ПРОВОДОМ

На рис. 3.34, а обозначено: $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — фазные напряжения генератора, которые, если можно пренебречь внутренними сопротивлениями генератора, равны фазным ЭДС E_A, E_B, E_C ; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ — фазные напряжения приемника; $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ — линейные напряжения генера-

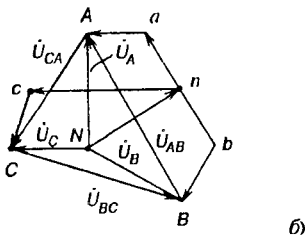
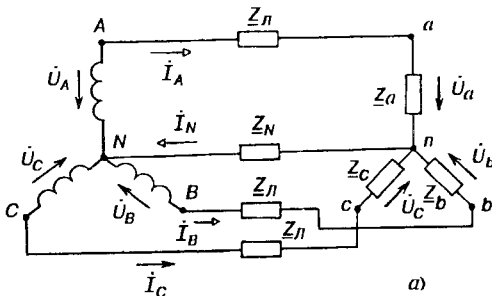


Рис. 3. 34

тора: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$; $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ — линейные напряжения приемника; Z_n — эквивалентное сопротивление одного провода линии; Z_N — эквивалентное сопротивление нейтрального провода; Z_a, Z_b, Z_c — фазные сопротивления приемника. Векторная диаграмма напряжений приведена на рис. 3.34, б.

Напряжение между нейтральными точками генератора и приемника (смещение нейтрали), если принять $\varphi_N = 0$

$$\dot{U}_N = \varphi_n - \dot{\varphi}_N = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N},$$

где

$$Y_A = 1/(Z_n + Z_a); Y_B = 1/(Z_n + Z_b); Y_C = 1/(Z_n + Z_c); Y_N = 1/Z_N.$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_N) Y_A; \dot{I}_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_N) Y_B; \dot{I}_C = (\dot{U}_C - \dot{U}_N) Y_C.$$

Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$. Фазные и линейные напряжения приемника:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_n = Z_a \dot{I}_A; \dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \\ \dot{U}_b &= \dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_n = Z_b \dot{I}_B; \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \\ \dot{U}_c &= \dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_n = Z_c \dot{I}_C; \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \end{aligned}$$

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА БЕЗ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА

Пусть обмотки генератора соединены в звезду. Трехфазный приемник может быть соединен в треугольник или звезду.

Соединение звезда — звезда. Во все предыдущие формулы подставляется $Y_N = 0$.

Если же заданы линейные напряжения, то

$$\dot{U}_{An} = \frac{\dot{U}_{AB} Y_B - \dot{U}_{CA} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$\dot{U}_{Bn} = \frac{\dot{U}_{BC} Y_C - \dot{U}_{AB} Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$\dot{U}_{Cn} = \frac{\dot{U}_{CA} Y_A - \dot{U}_{BC} Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$\dot{I}_A = Y_A \dot{U}_{An}; \dot{I}_B = Y_B \dot{U}_{Bn}; \dot{I}_C = Y_C \dot{U}_{Cn}.$$

Соединение звезда — треугольник (рис. 3.35, а). Трехфазный приемник, соединенный в треугольник, преобразуем в звезду. Рассчитываются токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и линейные напряжения приемника, как указано выше. Фазные токи:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab}/Z_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc}/Z_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca}/Z_{ca}.$$

Обмотка генератора соединена треугольником.

Соединение треугольник — треугольник. Если симметричный генератор соединен треугольником, то в общем случае для расчета внешней цепи данный генератор можно заменить симметричным генератором, соединенным звездой ($U_A = U_B =$

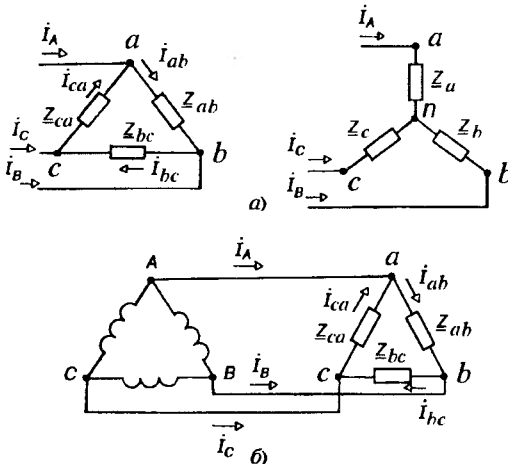


Рис. 3.35

$= U_C = U_{ab} / \sqrt{3}$) и далее проводить расчет, как указано выше.

Если принять $Z_n = 0$ (рис. 3.35, б), то проще сначала определить:

$$\begin{aligned} i_{ab} &= \dot{U}_{AB} / Z_{ab}; \quad i_{bc} = \dot{U}_{BC} / Z_{bc}; \\ i_{ca} &= \dot{U}_{CA} / Z_{ca}, \end{aligned}$$

а затем

$$i_A = i_{ab} - i_{ca}; \quad i_B = i_{bc} - i_{ab}; \quad i_C = i_{ca} - i_{bc}.$$

СИММЕТРИЧНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

Фазные напряжения симметричного генератора, соединенного звездой (рис. 3.36):

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t; \quad u_B = U_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\ u_C &= U_m \sin (\omega t + 120^\circ), \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} U_A &= U_\phi; \quad U_B = U_\phi \angle -120^\circ; \\ U_C &= U_\phi \angle 120^\circ. \end{aligned}$$

Линейные напряжения: $U_L = \sqrt{3} U_\phi$; $\dot{U}_{AB} = U_L \angle +30^\circ$; $\dot{U}_{BC} = U_L \angle -90^\circ$; $\dot{U}_{CA} = U_L \angle +150^\circ$.

При симметричном приемнике, соединенном звездой, $Z_a = Z_b = Z_c = Z$; смещение нейтрали $U_N = 0$.

Линейные токи:

$$I_A = I_B = I_C = U_\phi / |Z_n + Z| = I_L$$

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° , ток $I_N = 0$ и при наличии нейтрального провода. Фазные и линейные напряжения приемника соответственно одинаковы по значению:

$$U_a = U_b = U_c; \quad U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = \sqrt{3} U_a.$$

При симметричном приемнике, соединенном треугольником, $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z$ и линейные токи одинаковы по значению

$$I_A = I_B = I_C = U_\phi / |Z_L + Z/3| = I_L$$

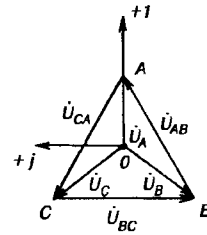


Рис. 3.36

и сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° .

Аналогично фазные токи приемника

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_L / \sqrt{3}$$

и фазные напряжения приемника

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = |Z| I_L / \sqrt{3}$$

Для обоих случаев:

активная мощность генератора

$$P_G = 3 U_A I_A \cos \varphi_G = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_G;$$

реактивная мощность генератора

$$Q_G = 3 U_A I_A \sin \varphi_G = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_G,$$

где φ_G — угол сдвига фаз между фазным напряжением генератора и током в той же фазе генератора, который равен току в линии при соединении обмоток генератора звездой;

активная мощность приемника

$$P_n = 3 U_a I_a \cos \varphi_n = \sqrt{3} U_{ab} I_L \cos \varphi_n,$$

где φ_n — угол сдвига между фазным напряжением приемника и током в той же фазе приемника, который равен I_L только при соединении звездой;

полная мощность генератора

$$S_G = 3 U_A I_A = \sqrt{3} U_L I_L.$$

полная мощность приемника

$$S_n = 3 U_a I_a = \sqrt{3} U_{ab} I_L.$$

МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Метод симметричных составляющих состоит в приведении несимметричных трехфазных систем к симметричным. Метод основан на разложении каждого из трех заданных (или исконых) векторов (например, $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$) на сумму трех векторов: нулевой $\dot{U}_0$, прямой $\dot{U}_1$ и обратной $\dot{U}_2$ последовательностей (рис. 3.37):

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_0 + a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_0 + a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / 3; \\ \dot{U}_1 &= (\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C) / 3; \\ \dot{U}_2 &= (\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C) / 3, \end{aligned}$$

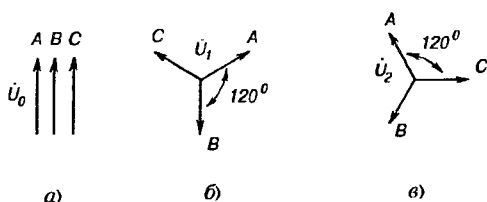


Рис. 3. 37

где $a = 1 e^{j 120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$ — фазовый множитель; $a^2 = 1 e^{j 120^\circ} = 1 \angle -120^\circ$.

Составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть найдены геометрическим построением в соответствии с приведенными аналитическими выражениями. После разложения несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие применяют метод наложения, т.е. рассчитывают цепь отдельно для нулевой, прямой и обратной последовательностей. При этом сопротивления для нулевой, прямой и обратной последовательностей могут быть различными. Данный метод позволяет суммировать не только токи и напряжения, но и активные и реактивные мощности:

$$P = 3 U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3 U_2 I_2 \cos \varphi_2;$$

$$Q = 3 U_0 I_0 \sin \varphi_0 + 3 U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3 U_2 I_2 \sin \varphi_2.$$

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Фазные напряжения могут кроме основной гармоники содержать еще нечетные высшие гармоники:

$$u_A = U_{1m} \sin \omega_1 t + U_{3m} \sin (3 \omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5 \omega_1 t + \psi_5) + U_{7m} \sin (7 \omega_1 t + \psi_7) + \dots;$$

$$u_B = U_{1m} \sin (\omega_1 t - 120^\circ) + U_{3m} \sin (3 \omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5 \omega_1 t + 120^\circ + \psi_5) + \dots;$$

$$u_C = U_{1m} \sin (\omega_1 t + 120^\circ) + U_{3m} \sin (3 \omega_1 t + \psi_3) + U_{5m} \sin (5 \omega_1 t - 120^\circ + \psi_5) + \dots$$

Все высшие гармоники, кратные трем (3-я, 9-я и т. д.), имеют во всех фазах симметричной трехфазной системы в любой момент времени тождественные значения как составляющие нулевой последовательности. Первая (7-я, 13-я, 19-я и т. д.) гармоника во всех фазах сдвинута так же, как составляющие прямой последовательности. Пятая (11-я, 17-я и т. д.) гармоника имеет обратную последовательность.

Действующее значение фазного напряжения генератора, обмотки которого соединены звездой,

$$U_\phi = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots}$$

Линейное напряжение:

$$U_\pi = \sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots} < \sqrt{3} U_\phi.$$

При симметричной нагрузке в системе без нейтрального провода в линейных токах отсутству-

ют гармоники, кратные трем. При симметричной нагрузке в системе с нейтральным проводом линейные токи содержат все нечетные гармоники, а ток в нейтральном проводе:

$$I_N = 3 \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

При соединении обмоток генератора треугольником для гармоник, кратных трем, образуется короткозамкнутый контур и в линейных напряжениях, как при соединении звездой, гармоники, кратные трем, отсутствуют.

Степень несинусоидальности напряжения (тока и т. д.) оценивается коэффициентами амплитуды k_a , формы k_ϕ , искажений $k_{иск}$ и гармоник k_r :

$$k_a = U_{max}/U; \quad k_\phi = U/U_{cp};$$

$$k_{иск} = U_1/U; \quad k_r = U_s/U_1,$$

где U_{max} — максимальное (пиковое) значение;

$U_s = \sqrt{U^2 - U_0^2 - U_1^2}$. Для синусоидальных величин $k_a = \sqrt{2}$; $k_\phi = 1,11$; $k_{иск} = 1$; $k_r = 0$.

3.8. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

ЗАКОНЫ КОММУТАЦИИ

Переходные (динамические) процессы возникают при подключении источников энергии, а также в результате изменения конфигурации цепей, заключающемся в подключении или отключении отдельных элементов. Если в цепи имеются индуктивные или емкостные элементы, запаасающие электромагнитную энергию, то переход из одного состояния в другое не может совершиться мгновенно, если мощность источников сигнала конечна.

Из условия невозможности скачкообразного изменения энергии следует, что заряды (напряжения) емкостных элементов (ниже для краткости емкостные заряды или напряжения) и потокоцепления (токи) индуктивных элементов (ниже индуктивные токи) в момент коммутации $t = 0$ непрерывны:

$$q_C(0-) = q_C(0+); \quad u_C(0-) = u_C(0+);$$

$$\psi_L(0-) = \psi_L(0+); \quad i_L(0-) = i_L(0+).$$

Здесь $q_C(0-)$ и $u_C(0-)$ — заряд и напряжение любого емкостного элемента непосредственно перед коммутацией; $q_C(0+)$ и $u_C(0+)$ — заряд и напряжение такого элемента непосредственно после коммутации; аналогично определяются потокоцепление ψ_L и ток i_L любого индуктивного элемента непосредственно до или после коммутации.

Записанные равенства называют законами коммутации, значения $u_C(0)$, $i_L(0)$ — независимыми начальными условиями.

КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД

Для схемы после коммутации можно составить систему интегродифференциальных уравнений, используя законы Кирхгофа и компонентные урав-

нения. Из этой системы исключают все переменные, кроме искомого напряжения или тока. В результате получается дифференциальное уравнение n -го порядка

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = F(t),$$

где $a_j, j = 1 \dots n$ — известные коэффициенты; y — искомое напряжение или ток; $F(t)$ — известная функция времени, определяемая источниками энергии. Решение этого уравнения ищется в виде

$$y(t) = y_{св}(t) + y_y(t),$$

где $y_{св}(t)$ — свободная составляющая; $y_y(t)$ — установившаяся (принужденная) составляющая.

Установившаяся составляющая рассчитывается рассмотренными выше методами. Свободную составляющую, являющуюся общим решением дифференциального уравнения при $F(t) = 0$, находят в виде суммы экспонент

$$y_{св}(t) = \sum_{i=1}^n K_i e^{\lambda_i t},$$

где λ_i — корни характеристического уравнения (в общем случае комплексные), т. е. уравнения

$$a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0 = 0;$$

K_i — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий, т. е. по значению $y_{св}(0)$ и значениям $n-1$ производных от $y_{св}(t)$ при $t = 0$.

Значение $y_{св}(0) = y(0) - y_y(0)$, где в общем случае зависимое начальное условие $y(0)$ находится из уравнений схемы, записанных при $t = 0$ с учетом законов коммутации [значения $u_C(0-)$ и $i_L(0-)$ вычисляются из уравнений схемы до коммутации].

Значение производной

$$\frac{d^k y_{св}}{dt^k} = \frac{d^k y}{dt^k} - \frac{d^k y_y}{dt^k}$$

при $t = 0$ нетрудно найти, если известно значение производной $d^k y / dt^k$ при $t = 0$; $k = 1 \dots (n-1)$.

Производную $d^k y / dt^k$ определяют, дифференцируя k раз уравнения схемы.

Если среди корней характеристического уравнения есть кратные, например, $\lambda_1 = \lambda_2$, то им соответствует слагаемое свободной составляющей $y'_{св} = (K_1 + K_2 t) e^{\lambda t}$. При комплексно-сопряженных корнях $\lambda_{1,2} = -\delta \pm j\omega$ соответствующее слагаемое свободной составляющей удобно представить в виде $y_{св} = K e^{-\delta t} \sin(\omega t + \alpha)$, где K и α — неизвестные постоянные.

Пример (рис. 3.38). В момент $t = 0$ к цепи подключается источник $e(t) = E_0$ (закрывается ключ). Параметры схемы $E_0 = 1,8$ мВ, $R = 400$ Ом,

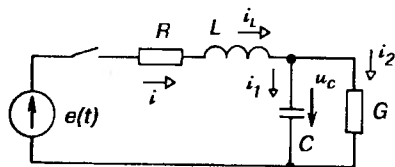


Рис. 3.38

$G = 0,02$ См, $L = 10$ мГн, $C = 1$ мкФ; $u_C(0) = 0,25$ мВ, $i_L(0) = 0$.

Определить $i_2(t)$.

По законам Кирхгофа справедливы уравнения

$$i = i_1 + i_2; Ri + L \frac{di}{dt} + u_C = 0.$$

Используя соотношения $i_1 = C du_C / dt$, $i_2 = G u_C$, преобразуем эти уравнения к одному дифференциальному уравнению второго порядка относительно тока i_2 :

$$\frac{d^2 i_2}{dt^2} + \left(\frac{G}{C} + \frac{R}{L} \right) \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{LC} (1 + GR) i_2 = \frac{G}{LC} E_0.$$

Характеристическое уравнение

$$\lambda^2 + \left(\frac{G}{C} + \frac{R}{L} \right) \lambda + \frac{1 + GR}{LC} = 0$$

или с учетом численных значений параметров

$$\lambda^2 + 6 \cdot 10^4 \lambda + 9 \cdot 10^8 = 0$$

имеет кратный корень $\lambda_1 = \lambda_2 = -3 \cdot 10^4$ 1/с. Искомый ток

$$i_2(t) = i_{2y}(t) + (K_1 + K_2 t) e^{\lambda_1 t}, \quad t \geq 0,$$

где $i_{2y}(t) = E_0 / (R + 1/G) = 4 \cdot 10^{-6}$ А или

$$i_2(t) = 4 \cdot 10^{-6} + (K_1 + K_2 t) e^{-3 \cdot 10^4 t}.$$

Независимые начальные условия известны: $i(0) = i_L(0) = 0$, $u_C(0) = 0,25$ мВ = $2,5 \cdot 10^{-3}$ В.

Зависимые начальные условия $i_2(0)$ и $i_2'(0)$ определим из уравнения схемы в момент $t = 0$:

$$i_2(0) = G u_C(0) = 5 \cdot 10^{-6} \text{ А},$$

$$i_2'(0) = G \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{G}{C} i_1(0) = \frac{G}{C} (i(0) - i_2(0)) = -0,1 \text{ А/с}.$$

Производная искомого тока:

$$i_2'(t) = K_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 (K_1 + K_2 t) e^{\lambda_1 t}.$$

Подстановка в выражения для $i_2(t)$ и $i_2'(t)$ значений $t = 0$, $i_2(0)$, $i_2'(0)$ дает возможность определить постоянные $K_1 = 10^{-6}$ А, $K_2 = -0,07$ А/с. Таким образом,

$$i_2(t) = 4 \cdot 10^{-6} + (10^{-6} - 0,07t) e^{-3 \cdot 10^4 t} \text{ А}.$$

При использовании классического метода расчета нет необходимости непосредственно составлять дифференциальное уравнение.

Характеристическое уравнение в этом случае записывается в виде

$$\underline{Z}(\lambda) = 0, \quad \underline{Y}(\lambda) = 0,$$

где $\underline{Z}(\lambda)$ — входное сопротивление относительно двух точек разрыва любой ветви; $\underline{Y}(\lambda)$ — входная проводимость относительно любой пары узлов; при этом каждой индуктивности L и каждой емкости C соответствуют сопротивления λL и $1/\lambda C$ (или проводимости $1/\lambda L$ и λC).

ИНТЕГРАЛЫ НАЛОЖЕНИЯ

При воздействии на цепь источников ЭДС и тока произвольной формы можно рассчитать токи и напряжения в схеме с помощью интегралов наложения (интегралов Дюамеля). При этом предельно определенными являются переходные $h(t)$ или импульсные $h_\delta(t)$ характеристики схем.

Переходной характеристикой $h(t)$ называется реакция (ток, напряжение) схемы при нулевых начальных условиях на воздействие источника (ЭДС, тока) в виде единичной функции

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t > 0. \end{cases}$$

В точке $t = 0$ единичная функция изменяется скачком от 0 до 1.

Импульсной характеристикой $h_\delta(t)$ называется реакция схемы при нулевых начальных условиях на воздействие в виде единичного импульса

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \infty, & t = 0, \\ 0, & t > 0, \end{cases}$$

причем $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \int_0^{0+} \delta(t) dt = 1$. Функцию $\delta(t)$

можно считать производной от $1(t)$.

Если на схему действует источник ЭДС произвольной формы

$$e(t) = e(0) 1(t) + \int_0^{\infty} e'(\tau) 1(t-\tau) d\tau;$$

то ток в любой ветви

$$i(t) = e(0) h(t) + \int_0^t e'(\tau) h(t-\tau) d\tau;$$

$$i(t) = e(0) h(t) + \int_0^t e'(t-\tau) h(\tau) d\tau,$$

где $h(t)$ является переходной проводимостью.

Справедливы еще другие формулы:

$$i(t) = h(0) e(t) + \int_0^t h'(\tau) e(t-\tau) d\tau;$$

$$i(t) = h(0) e(t) + \int_0^t h'(t-\tau) e(\tau) d\tau,$$

где $h'(t) = h_\delta(t)$ — импульсная проводимость.

Аналогично записываются выражения для напряжения на зажимах любой ветви схемы, а также

ток и напряжения при воздействии источника тока $J(t)$ произвольной формы.

ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД

Операторный метод основан на преобразовании Лапласа (или Карсона). Для функции времени $f(t)$ (оригинала) пара преобразований Лапласа имеет вид:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt;$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(p) e^{pt} dp,$$

где $p = \sigma + j\omega$ — комплексная переменная; $F(p)$ — прямое преобразование (изображение) функции $f(t)$ по Лапласу. Второе равенство называют обратным преобразованием; интегрирование выполняется по бесконечной прямой, параллельной оси $j\omega$ и расположенной в области сходимости интеграла.

Изображение по Карсону отличается от изображения по Лапласу множителем p . Далее рассматривается только преобразование Лапласа. Если преобразование Лапласа функции $f(t)$ обозначить как

$$F(p) = \mathcal{L}\{f(t)\},$$

тогда напряжение производной и интеграла от функции $f(t)$ будут иметь вид:

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = pF(p) - f(0);$$

$$\mathcal{L}\left\{\int_0^t f'(\tau) d\tau\right\} = \frac{F(p)}{p}.$$

Топологические и компонентные уравнения цепи, записанные во временной области, можно преобразовать по Лапласу, учитывая выражения для изображений производной и интеграла, а также свойство линейности, которым обладает преобразование Лапласа. В результате получаются уравнения цепи в операторной форме, которые являются алгебраическими.

Уравнения в операторной форме можно формировать по операторным схемам, которые составляются на основе операторных моделей схемных элементов — индуктивных, емкостных (рис. 3.39, а—в) и др. В свою очередь, операторные модели находятся путем преобразования по Лапласу уравнений для этих элементов во временной области. В операторных моделях (рис. 3.39) pL , $1/pC$ — операторные сопротивления индуктивного и емкостного элементов; источники $L i_L(0)$, $i_L(0)/p$, $C u_C(0)$ и др. учитывают ненулевые начальные условия.

Из операторных уравнений схемы необходимо получить изображения искомым переменных. Далее находятся оригиналы, т. е. применяется обратное преобразование Лапласа. Вместо непосредственного интегрирования удобнее воспользоваться теоремой разложения. Если изображение

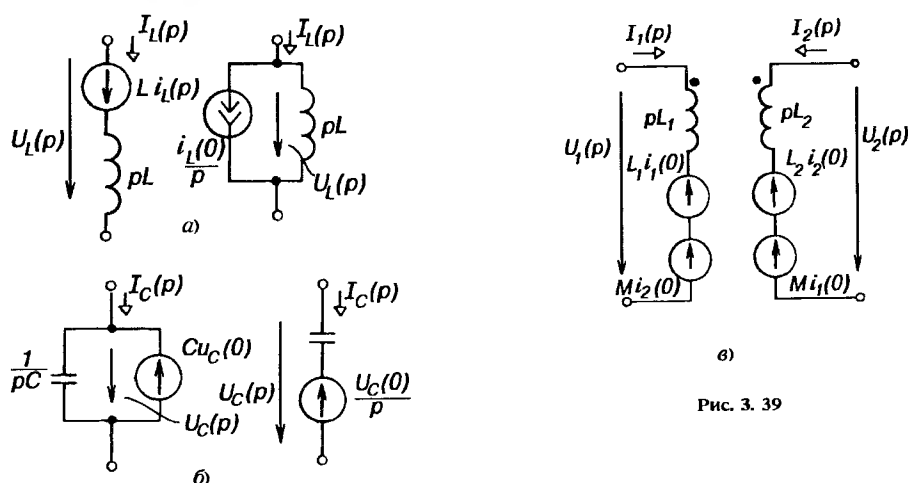


Рис. 3.39

Т а б л и ц а 3.3. Оригиналы и изображения по Лапласу

Оригинал $f(t) = f$	Изображение $F(p) = F$	Оригинал $f(t) = f$	Изображение $F(p) = F$
f	F	$\cos \omega_0 t$	$\frac{p}{p^2 + \omega_0^2}$
df/dt	$pF - f(0)$	$\sin \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}$
$\int_0^t f dt$	F/p	$\cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\frac{p \cos \varphi - \omega_0 \sin \varphi}{p^2 + \omega_0^2}$
$1(t)$ — функция Хевисайда	$1/p$	$\sin(\omega_0 t + \varphi)$	$\frac{p \sin \varphi + \omega_0 \cos \varphi}{p^2 + \omega_0^2}$
$\delta(t)$ — функция Дирака	1	$t \cos \omega_0 t$	$\frac{p^2 - \omega_0^2}{(p^2 + \omega_0^2)^2}$
t	$1/p^2$	$t \sin \omega_0 t$	$\frac{2\omega_0 p}{(p^2 + \omega_0^2)^2}$
t^n (n — целое)	$n!/p^{n+1}$	$e^{-at} \cos \omega_0 t$	$\frac{p + a}{(p + a)^2 + \omega_0^2}$
e^{-at}	$\frac{1}{p + a}$	$e^{-at} \sin \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{(p + a)^2 + \omega_0^2}$
$1 - e^{-at}$	$\frac{a}{p(p + a)}$	$\frac{\cos at - \cos bt}{b^2 - a^2}$	$\frac{p}{(p^2 + a^2)(p^2 + b^2)}$
$(1 - at)e^{-at}$	$\frac{p}{(p + a)^2}$	$\text{sh } \omega_0 t$	$\frac{\omega_0}{p^2 - \omega_0^2}$
te^{-at}	$\frac{1}{(p + a)^2}$	$\text{ch } \omega_0 t$	$\frac{p}{p^2 - \omega_0^2}$
$t^{n-1}e^{-at}$ (n — целое)	$\frac{(n-1)!}{(p + a)^n}$		
$\frac{e^{-bt} - e^{-at}}{a - b}$	$\frac{1}{(p + a)(p + b)}$		
$\frac{ae^{-at} - e^{-bt}}{a - b}$	$\frac{p}{(p + a)(p + b)}$		
$1 + \frac{be^{-at} - ae^{-bt}}{a - b}$	$\frac{ab}{p(p + a)(p + b)}$		
$1 - (1 + at)e^{-at}$	$\frac{a^2}{p(p + a)^2}$		

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \text{ или } F(p) = \frac{F_1(p)}{pF_3(p)},$$

то по теореме разложения

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t},$$

или

$$f(t) = \frac{F_1(0)}{F_3(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_3'(p_k)} e^{p_k t},$$

где p_k — полюсы функции $F(p)$, т. е. корни уравнения $F_2(p) = 0$ или $F_3(p) = 0$; $F'(p) = dF/dp$; n — число корней.

Записанные формулы справедливы, если полиномы $F_2(p)$ или $F_3(p)$ не имеют нулевых или кратных корней. Более общая формула

$$f(t) = \sum_k \frac{1}{(m_k - 1)!} \times \left\{ \frac{d^{m_k-1}}{dp^{m_k-1}} \left[(p - p_k)^{m_k} F(p) e^{p t} \right] \right\}_{p=p_k},$$

где $m_k \geq 1$ — кратность полюса p_k .

В табл. 3.3 приведен ряд функций $f(t)$ (оригиналов) и их изображений по Лапласу. В простых случаях оригинал можно найти по таблице, применяя разложение изображения $F(p)$ на простые дроби.

Пример. Для схемы после коммутации, приведенной на рис. 3.38, построена соответствующая операторная схема (рис. 3.40), где $E(p) = E_0/p$. Применяя узловое уравнение, легко найти изображение $I_2(p)$ тока $i_2(t)$:

$$I_2(p) = GU(p) = G \frac{E(p)/(R + pL) + Cu_C(0)}{1/(R + pL) + G + pC}.$$

Полином $p^2 + 6 \cdot 10^4 p + 9 \cdot 10^8 = 0$ имеет кратный корень $p_{1,2} = -3 \cdot 10^4$. Разлагая $I_2(p)$ на простые дроби, получаем

$$I_2(p) = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{p} + \frac{10^{-6}}{p + 3 \cdot 10^4} - \frac{0,07}{(p + 3 \cdot 10^4)^2}.$$

По табл. 3.3 записываем оригинал

$$i_2(t) = 4 \cdot 10^{-6} + 10^{-6} e^{-3 \cdot 10^4 t} - 0,07 t e^{-3 \cdot 10^4 t}.$$

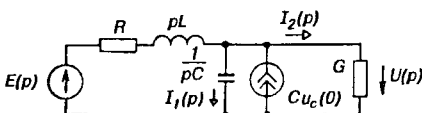


Рис. 3.40

МЕТОД ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ

Метод переменных состояния заключается в составлении и решении канонических уравнений схемы

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 v;$$

$$y = A_2 x + B_2 v,$$

где x — вектор переменных состояния; $\dot{x}$ — вектор производных dx/dt ; y — вектор выходных переменных (искомых напряжений и токов); v — вектор параметров источников (ЭДС источников ЭДС и токов источников тока); A_1 , B_1 и A_2 , B_2 — матричные коэффициенты, определяемые топологией и параметрами схемы.

Первое матричное уравнение записанной системы — это дифференциальные уравнения первого порядка, разрешенные относительно производных.

Как правило, в качестве переменных состояния выбираются емкостные напряжения и индуктивные токи, определяющие независимые начальные условия.

Наиболее просто уравнения состояния формируются для цепей, не содержащих особых контуров (т. е. контуров, состоящих из емкостных элементов или из емкостных элементов и источников ЭДС), особых сечений (т. е. сечений, состоящих из индуктивных элементов или из индуктивных элементов и источников тока) и управляемых источников. В противном случае в схеме появляются зависимые переменные состояния.

Пусть схема содержит ветви с источниками ЭДС (характеризуемые векторами ЭДС e и тока i_e), с источниками тока (u_J , J), емкостные ветви (u_C , i_C), индуктивные ветви (u_L , i_L), а также резисторы. Здесь каждый элемент схемы рассматривается как отдельная ветвь; особые контуры, сечения и управляемые источники отсутствуют.

Если каждую емкость (индуктивность) заменить источником ЭДС с вектором напряжений u_C (источником тока с вектором токов i_L), то относительно всех источников схему можно рассматривать как резистивный многополюсник и рассчитать его гибридную матрицу в соответствии с уравнением:

$$\begin{pmatrix} i_C \\ i_e \\ u_L \\ u_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{CC} & H_{Ce} & H_{CL} & H_{CJ} \\ H_{eC} & H_{ee} & H_{eL} & H_{eJ} \\ H_{LC} & H_{Le} & H_{LL} & H_{LJ} \\ H_{JC} & H_{Je} & H_{JL} & H_{JJ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_C \\ e \\ i_L \\ J \end{pmatrix},$$

где H_{CC} , H_{Ce} и т. д. — соответствующие подматрицы гибридной матрицы H .

В этом случае при

$$x = \begin{pmatrix} u_C \\ i_L \end{pmatrix}, \quad v = \begin{pmatrix} e \\ J \end{pmatrix}$$

матричные коэффициенты уравнений состояния A_1 и B_1 имеют вид:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{CC} & H_{CL} \\ H_{LC} & H_{LL} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{Ce} & H_{CJ} \\ H_{Le} & H_{LJ} \end{bmatrix}.$$

Матрицы A_2 и B_2 зависят от выбора выходных переменных (элементов вектора y).

Для простых цепей элементы гибридной матрицы резистивного многополюсника легко записать, используя принцип наложения. Для сложных цепей эта матрица рассчитывается на ЭВМ, например, с помощью расширенных узловых уравнений.

При наличии зависимых переменных состояния (из-за особых контуров и сечений и управляемых источников) их следует исключить.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ

Для общего случая решение уравнений состояния можно записать с помощью матричной функции времени — матричной экспоненты $e^{A_1 t}$:

$$x(t) = e^{A_1 t} x(0) + \int_0^t e^{A_1 (t-\tau)} B_1 v(\tau) d\tau,$$

$$y(t) = A_2 e^{A_1 t} x(0) + A_2 \int_0^t e^{A_1 (t-\tau)} B_1 v(\tau) d\tau + B_2 v(t).$$

Методы вычисления матричной экспоненты приведены в списке литературы.

На ЭВМ уравнения состояния решаются методами численного интегрирования, которые отличаются друг от друга объемом вычислений, точностью и устойчивостью вычислительного процесса. Как правило, программы численного интегрирования входят в типовое программное обеспечение.

3.9. ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

ЛИНИЯ С ПОТЕРЯМИ

Первичные параметры однородной (двухпроводной или кабельной линии): R_0 (Ом/км), L_0 (Гн/км), G_0 (См/км), C_0 (Ф/км) — резистивное сопротивление, индуктивность, резистивная проводимость и емкость на 1 км длины (можно задавать и на любую другую единицу длины).

Вторичные параметры — волновое (характеристическое) сопротивление и коэффициент распространения:

$$\underline{Z}_B = Z_B \angle \theta = \sqrt{Z_0 Y_0};$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_0 Y_0},$$

где $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$; $\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$; α — коэффициент ослабления, Нп/км; β — коэффициент фазы, рад/км.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ЛИНИЙ ПО ОПЫТАМ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Если в начале линии длиной l измерить напряжение и ток при ХХ (разомкнуты выводы в конце линии) $\dot{U}_{1x}$ и $\dot{I}_{1x}$, при КЗ $\dot{U}_{1k}$ и $\dot{I}_{1k}$, а также углы сдвига фаз $\angle \dot{U}_{1x} \dot{I}_{1x}$ и $\angle \dot{U}_{1k} \dot{I}_{1k}$, то можно вычислить все параметры линии:

$$\underline{Z}_x = \dot{U}_{1x} / \dot{I}_{1x}; \quad \underline{Z}_k = \dot{U}_{1k} / \dot{I}_{1k};$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_k} = R_B + jX_B = z_B \angle \theta;$$

$$\text{th } \gamma l = \text{th } (\alpha + j\beta) l = \sqrt{\underline{Z}_k / \underline{Z}_x};$$

$$R_0 = \alpha R_B - \beta X_B; \quad X_0 = \omega L_0 = \beta R_B + \alpha X_B;$$

$$G_0 = \frac{\alpha R_B + \beta X_B}{z_B^2};$$

$$B_0 = \omega C_0 = \frac{\beta R_B - \alpha X_B}{z_B^2}.$$

Если заданы (известны) напряжение $\dot{U}_2$ и ток $\dot{I}_2$ в конце линии, то напряжение и ток в любом поперечном сечении (точке) линии

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \text{ch } \gamma x + \dot{I}_2 \text{sh } \gamma x;$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} \text{sh } \gamma x + \dot{I}_2 \text{ch } \gamma x,$$

где x — расстояние от конца линии до данной точки.

Последние уравнения могут быть записаны иначе, если заменить гиперболические функции показательными:

$$\dot{U} = \underline{D}_1 e^{\gamma x} + \underline{D}_2 e^{-\gamma x} = \dot{U}_{\text{пад}} + \dot{U}_{\text{отр}};$$

$$\dot{I} = \frac{\underline{D}_1}{\underline{Z}_B} e^{\gamma x} - \frac{\underline{D}_2}{\underline{Z}_B} e^{-\gamma x} = \dot{I}_{\text{пад}} - \dot{I}_{\text{отр}},$$

где

$$\underline{D}_1 = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_B}{2}; \quad \underline{D}_2 = \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_B}{2},$$

т. е. напряжение и ток в каждой точке можно представить как сумму падающей и отраженной волн, а волновое сопротивление

$$\underline{Z}_B = \dot{U}_{\text{пад}} / \dot{I}_{\text{пад}} = \dot{U}_{\text{отр}} / \dot{I}_{\text{отр}}.$$

Фазовая скорость волны:

$$c = \omega / \beta = \lambda / T = \lambda f,$$

где λ — длина волны; f — частота тока; T — период.

При сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_H$ коэффициент отражения

$$\rho = \frac{\underline{D}_2}{\underline{D}_1} = \frac{\dot{U}_{2 \text{отр}}}{\dot{U}_{2 \text{пад}}} = \frac{\dot{I}_{2 \text{отр}}}{\dot{I}_{2 \text{пад}}} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B}.$$

При согласованной нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_B$ отраженной волны нет:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 e^{\gamma x} \quad \dot{I} = \dot{I}_2 e^{\gamma x} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_B} e^{\gamma x};$$

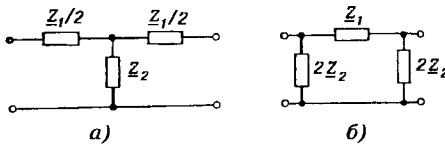


Рис. 3. 41

КПД линии

$$\eta = P_2/P_1 = (U_2 I_2 \cos \theta) / (U_1 I_1 \cos \theta) = e^{-2\alpha l};$$

входное сопротивление

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 = \underline{Z}_v.$$

При произвольной нагрузке входное сопротивление линии

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх}} &= \underline{Z}_v \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_v \operatorname{th} \chi l}{\underline{Z}_v + \underline{Z}_n \operatorname{th} \chi l} = \\ &= \underline{Z}_v \frac{1 + \rho e^{-2\chi l}}{1 - \rho e^{-2\chi l}}, \end{aligned}$$

где l — длина линии.

Если линия состоит из двух участков с различными параметрами, то сначала необходимо вычислить входное сопротивление второго участка. Входное сопротивление всей линии рассчитывается как входное сопротивление первого участка с сопротивлением нагрузки, равным входному сопротивлению второго участка. Аналогично рассчитывается входное сопротивление линии, состоящей из нескольких участков.

Схемы замещения линии приведены на рис. 3.41.

УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ

Элементы схемы замещения можно выразить через $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$, $\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ и длину линии l .

Для Т-образной схемы (рис. 3.41, а)

$$\underline{Z}_1/2 = \underline{Z}_0 l \underline{H}_1; \quad \underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 l \underline{H}_2.$$

Для П-образной схемы (рис. 3.41, б)

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 l \underline{H}_2; \quad \underline{Y}_2/2 = 1/2 \underline{Z}_2 = \underline{Y}_0 l \underline{H}_1.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \underline{H}_1 &= (\operatorname{th} \frac{\chi l}{2}) / \chi l = \\ &= \frac{1}{2} - \frac{(\chi l)^2}{24} + \frac{(\chi l)^4}{240} - \frac{(\chi l)^6}{2370} + \dots; \\ \underline{H}_2 &= \frac{\operatorname{sh} \chi l}{\chi l} = \\ &= 1 + \frac{(\chi l)^2}{3!} + \frac{(\chi l)^4}{5!} + \frac{(\chi l)^6}{6!} + \dots \end{aligned}$$

Легко оценить ошибку при приближенном расчете, когда отбрасываются члены ряда, начиная с выбранной наивысшей степени χl .

Упрощенные формулы применяются и при расчете режима линии.

Если в уравнениях длинной линии $\operatorname{sh} \chi l$ и $\operatorname{ch} \chi l$ заменить соответствующими рядами, ограничиваясь первыми двумя членами, что допустимо, когда третий член разложения мал, то

$$\operatorname{sh} \chi l \approx \chi l + \frac{(\chi l)^3}{3!}; \quad \operatorname{ch} \chi l \approx 1 + \frac{(\chi l)^2}{2!}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{2} \right) + \\ &+ j \underline{Z}_0 l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{6} \right); \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 \underline{Y}_0 l \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{6} \right) + \\ &+ j \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_0 l \underline{Y}_0 l}{2} \right). \end{aligned}$$

При $f = 50$ Гц и $l \leq 200$ км эти формулы дают погрешность менее 2%.

П р и м е ч а н и е. Все формулы применимы к трехфазным симметричным линиям, причем U , I — фазные напряжение и ток; R_0 , L_0 , G_0 , C_0 — параметры на одну фазу.

ЛИНИЯ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ

Если $\omega L_0/R_0 > 5$ и $\omega C_0/G_0 > 5$, то для расчета вторичных параметров можно пользоваться приближенными формулами:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_v &= \sqrt{L_0/C_0}; \quad \beta = \omega \sqrt{L_0/C_0}; \\ \alpha &= \frac{R_0}{2} \sqrt{C_0/L_0} + \frac{G_0}{2} \sqrt{L_0/C_0}. \end{aligned}$$

ЛИНИЯ БЕЗ ПОТЕРЬ

Если можно считать $R_0 \approx 0$; $G_0 \approx 0$ (т. е. $R_0/\omega L_0 \ll 1$; $G_0/\omega C_0 \ll 1$), то $\alpha = 0$;

$$\begin{aligned} \chi &= j\beta; \quad \beta = 2\pi/\lambda = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad \underline{Z}_v = z_v = \\ &= \sqrt{L_0/C_0}; \quad c = \omega/\beta = 1/\sqrt{L_0 C_0} = \\ &= 1/\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}, \end{aligned}$$

где ϵ_r и μ_r — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды между проводами линии:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \beta x + j \dot{I}_2 z_v \sin \beta x;$$

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{z_v} \sin \beta x + \dot{I}_2 \cos \beta x;$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = z_v \frac{\underline{Z}_n + j z_v \operatorname{tg} \beta l}{z_v + j \underline{Z}_n \operatorname{tg} \beta l} = z_v \frac{1 + \rho e^{j 2\beta l}}{1 - \rho e^{j 2\beta l}}.$$

При чисто реактивной нагрузке, т. е. $\underline{Z}_n = j X_n$, при КЗ $\underline{Z}_n = 0$ и ХХ $\underline{Z}_n = \infty$ в линии образуются стоячие волны, а входное сопротивление получается чисто реактивным. При $\underline{Z}_n = 0$ получается $\underline{Z}_k = j z_v \operatorname{tg} \beta l$; при $\underline{Z}_n = \infty$ получается $\underline{Z}_x = -j z_v \operatorname{ctg} \beta l$.

При согласованной нагрузке $Z_H = R_H = z_B$ устанавливается режим бегущей волны:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 e^{j\beta x}; \dot{I} = \dot{I}_2 e^{j\beta x} = \frac{\dot{U}_2}{z_B} e^{j\beta x}.$$

Степень рассогласования нагрузки оценивается коэффициентом бегущей волны

$$k_B = \frac{U_{min}}{U_{max}} = \frac{U_{2пад} - U_{2отр}}{U_{2пад} + U_{2отр}} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}$$

или коэффициентом стоячей волны $k_c = 1/k_B$.

Здесь минимальное и максимальное значения напряжения (между ближайшими точками, в которых наблюдаются U_{min} и U_{max} , расстояние равно $\lambda/4$).

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Волны в линии возникают в результате различных коммутаций (подключение или отключение источников питания, приемников и т. д.) и под воздействием атмосферных явлений.

При подключении к линии источника ЭДС в линии возникает волна с напряжением той же формы, что и ЭДС.

При подключении к линии без потерь источника, внутренним сопротивлением которого нельзя пренебречь, а также при наличии нагрузки на входе линии форма возникающей волны может отличаться от формы ЭДС источника. Напряжение $u_{пад}$ и ток $i_{пад}$ возникающей волны определяются по схеме замещения, на которой линия представлена своим волновым сопротивлением z_B .

Пример. Источник E , $R_{вт}$, L подключается к линии без потерь (z_B), на входных выводах $1-1'$ которой есть приемник с сопротивлением R (рис. 3.42, а).

Для определения $u_{пад}$, $i_{пад}$ составлена схема замещения (рис. 3.42, б). Рассчитав переходный процесс в этой схеме любым из известных методов, можно найти ток $i_{пад}$ и напряжение $u_{пад} = z_B i_{пад}$. Например, при $z_B = 2 R_{вт} = R$ ток (время отсчитывается от момента мгновенного замыкания рубильника)

$$i_{пад} = \frac{E}{2R} (1 - e^{-\delta t}),$$

где $\delta = R/L$.

На рис. 3.42, в показан график распределения тока вдоль линии в момент t_1 , когда волна прошла путь $x_1 = c t_1$.

Для воздушных линий (без потерь) скорость волны $c = c_0 = 3 \cdot 10^5$ км/с, для кабелей $c = c_0 / \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$.

При движении волны по однородной линии без потерь форма волны не изменяется. Когда волна достигает конца линии, возникает новая (отраженная) волна, форма которой зависит и от характера нагрузки в конце линии. Если волна достигает места соединения двух линий, то возникают две

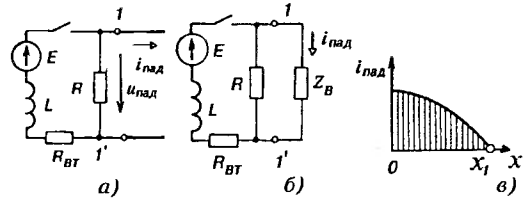


Рис. 3.42

новые волны: отраженная и проходящая во вторую линию.

Напряжения и токи отраженной и проходящей волн можно определить по схеме замещения.

На рис. 3.43, б дана схема замещения для общего случая отражения волны в месте соединения двух линий (рис. 3.43, а), когда в месте соединения включены еще элементы с сосредоточенными параметрами, составляющие произвольный пассивный четырехполюсник. На рис. 3.43, а: $u_{пад}$ — напряжение падающей волны; z_{B1} и z_{B2} — волновые сопротивления первой и второй линий. Если отражение происходит от конца линии (вторая линия отсутствует), то в схеме замещения отсутствует сопротивление z_{B2} и четырехполюсник следует рассматривать относительно его первичных выводов как двухполюсник. По схеме замещения определяются напряжения и токи на выводах $1-1'$ и $2-2'$ четырехполюсника: u_1 , i_1 , u_2 , i_2 .

Напряжение и ток отраженной волны:

$$u_{отр} = u_1 - u_{пад}; i_{отр} = i_{пад} - i_1,$$

где $i_{пад} = u_{пад}/z_{B1}$; $i_{отр} = u_{отр}/z_{B1}$.

Напряжение и ток проходящей волны:

$$u_{прох} = u_2; i_{прох} = i_2 = U_{прох}/z_{B2}.$$

Отсчет времени ($t = 0$) можно начать с момента, когда волна $u_{пад}$, движущаяся со скоростью c , достигнет места соединения линий (или конца линии).

При повторных отражениях необходимо применять принцип наложения.

Если переходный процесс возникает в результате не включения линии, а другой коммутации, например подключения приемника к линии, находящейся под напряжением, расчет по схеме замещения должен быть сведен к нулевым начальным условиям.

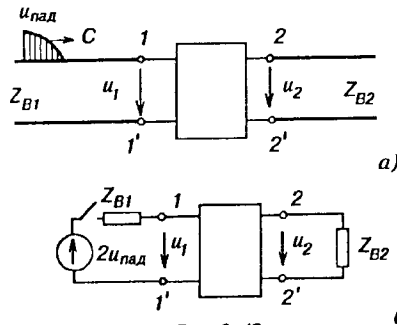


Рис. 3.43

3.10. НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ

КОМПОНЕНТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Схема нелинейной резистивной цепи содержит линейные и нелинейные резистивные двухполюсники, линейные зависимые и независимые источники ЭДС и тока.

Все множество ветвей схемы делится на два подмножества: G -ветви и R -ветви, которые являются частными случаями обобщенных y - и z -ветвей.

Источники тока (зависимые и независимые), разомкнутые ветви, нелинейные резисторы с однозначной характеристикой $i(u)$ являются G -ветвями. Источники ЭДС (зависимые и независимые), короткозамкнутые ветви, нелинейные резисторы с однозначной характеристикой $u(i)$ являются R -ветвями. Резисторы, у которых однозначны обе зависимости, могут быть произвольно отнесены к G - или R -ветвям. Компонентные уравнения для мгновенных значений величин

$$i' = i' (u'), \quad u'' = u'' (i''),$$

где i' и u' — векторы (матрицы-столбцы) токов и напряжений G -ветвей; i'' и u'' — векторы токов и напряжений R -ветвей. Эти уравнения можно представить в виде двух пар уравнений:

для линейных ветвей

$$i'_l = G u'_l + K_{21} i'_n - J;$$

$$u''_l = R i''_l + N_{21} u''_n - E;$$

для нелинейных ветвей

$$i'_n = i'_n (u'_n); \quad u''_n = u''_n (i''_n),$$

где индексы «л» и «н» у векторов токов и напряжений относятся соответственно к линейным и нелинейным ветвям; G — матрица проводимостей; K_{21} — матрица параметров ИТУТ; J — вектор токов независимых источников тока; R — матрица сопротивлений; N_{21} — матрица параметров ИНУН; E — вектор ЭДС независимых источников ЭДС.

В матрице G элементы главной диагонали соответствуют проводимостям линейных G -ветвей, недиагональные элементы — параметры ИТУН. В матрице R элементы главной диагонали соответствуют сопротивлениям линейных R -ветвей, недиагональные элементы — параметрам ИНУТ.

Параметры независимых источников тока и ЭДС могут быть постоянными или зависящими от времени. В последнем случае матричные уравнения описывают режим в соответствующий момент времени.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ

Дополнительно по 1-му и 2-му законам Кирхгофа справедливы уравнения

$$Ai = 0; \quad Bu = 0$$

или при разделении ветвей на два подмножества

$$A_1 i' + A_2 i'' = 0; \quad B_1 u' + B_2 u'' = 0,$$

где индексы 1 и 2 у подматриц относят соответственно к G - и R -ветвям.

В свою очередь, каждая из подматриц может быть разделена на две подматрицы, соответствующие линейным и нелинейным ветвям:

$$A_{1l} i'_l + A_{1n} i'_n + A_{2l} i''_l + A_{2n} i''_n = 0;$$

$$B_{1l} u'_l + B_{1n} u'_n + B_{2l} u''_l + B_{2n} u''_n = 0.$$

При расчете цепей в качестве переменных могут быть выбраны узловые потенциалы или контурные токи

$$u = A^T \varphi; \quad i = B^T i(k),$$

т. е. соответственно

$$u' = A'^T \varphi; \quad u'' = A''^T \varphi; \quad i' = B_1^T i(k);$$

$$i'' = B_2^T i(k).$$

Каждое из последних соотношений, в свою очередь, может быть представлено в виде двух

$$u'_l = A'^T_{jl} \varphi; \quad u'_n = A'^T_{jn} \varphi; \quad i'_l = B^T_{jl} i(k);$$

$$i'_n = B^T_{jn} i(k),$$

где $j = 1, 2$.

УЗЛОВЫЕ, КОНТУРНЫЕ И РАСШИРЕННЫЕ УЗЛОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Уравнения с узловыми потенциалами могут быть составлены при условии, что ветви схемы являются G -ветвями. В этом случае компонентные уравнения схемы

$$i_l = G u_l - J; \quad i_n = i_n(u_n); \quad A_l i_l + A_n i_n = 0$$

и матричное уравнение с узловыми потенциалами

$$A_l G A_l^T \varphi + A_n i_n(A_n^T \varphi) = A_l J.$$

Уравнения с контурными токами могут быть составлены при условии, что все ветви схемы являются R -ветвями. В этом случае уравнения схемы

$$u_l = R i_l - E; \quad u_n = u_n(i_n);$$

$$B_l u_l + B_n u_n = 0$$

и матричное уравнение с контурными токами

$$B_l R B_l^T i(k) + B_n u_n(B_n^T i(k)) = B_l E.$$

Уравнения с узловыми потенциалами нельзя составить непосредственно, т. е. без преобразования схемы, если схема наряду с G -ветвями содержит R -ветви (ветви с нулевым сопротивлением, нелинейные резисторы с немонотонной вольт-амперной характеристикой). Но можно составить расширенное узловое уравнение. Переменными в этом уравнении служат узловые потенциалы, а также токи линейных и нелинейных R -ветвей.

Нелинейные резистивные цепи описываются системой нелинейных алгебраических уравнений, для решения которых в общем случае применимы только численные методы. В отличие от линейных цепей уравнения нелинейных цепей могут не иметь решения или иметь несколько решений.

ИТЕРАЦИОННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

При решении уравнений нелинейной резистивной цепи методом Ньютона каждой итерации можно поставить в соответствие линейную резистивную эквивалентную схему. Если, например, применяется матричное уравнение с узловыми потенциалами, то

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + \Delta \varphi_k,$$

где $\Delta \varphi_k$ определяется из уравнения

$$\mathbf{F}'(\varphi_k) \Delta \varphi_k = -\mathbf{F}(\varphi_k)$$

и

$$\left[\mathbf{A}_L \mathbf{G} \mathbf{A}_L^T + \mathbf{A}_H \mathbf{G}_H(\mathbf{u}_{nk}) \mathbf{A}_H^T \right] \varphi_{k+1} = \mathbf{A}_L \mathbf{J} + \mathbf{A}_H \mathbf{J}_H,$$

где

$$\mathbf{u}_{nk} = \mathbf{A}_H^T \varphi_k; \mathbf{J}_H = \mathbf{G}(\mathbf{u}_{nk}) \mathbf{u}_{nk} - \mathbf{i}_H(\mathbf{u}_{nk}).$$

Для расчета вектора φ_{k+1} можно составить эквивалентную резистивную схему, которая получается при линеаризации характеристики $i_j(u_j)$ в точке $u_j = u_j(k)$, т. е. при замене каждой j -й нелинейной ветви исходной схемы параллельным соединением (рис. 3.44) проводимости $G_j(u_j(k))$ и источника тока

$$J_{nj} = G_j(u_j(k)) u_j(k) - i_j(u_j(k)).$$

Аналогично расчет вектора контурных токов для $(k+1)$ -й итерации может быть выполнен при помощи эквивалентной линейной схемы, которая получается при замене каждой j -й нелинейной ветви последовательным соединением сопротивления $R_j i_j(k)$ и источника ЭДС

$$E_{nj} = -R_j(i_j(k)) i_j(k) + u_j(i_j(k)),$$

как показано на рис. 3.44, б.

Таким образом, расчет нелинейной резистивной цепи при решении ее уравнений по методу Ньютона может быть сведен к расчету множества линейных резистивных схем — итерационных моделей цепи. Такая модель для расчета переменных $(k+1)$ -й итерации получается заменой нелинейных G -ветвей схемой по рис. 3.41, а, а R -ветвей — схемой по рис. 3.44, б; параметры этих схем G_j , J_{nj} и R_j , E_{nj} определяются соответственно при напряжениях и токах k -й итерации.

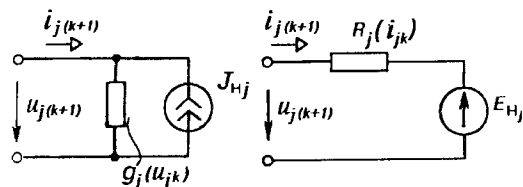


Рис. 3. 44

3.11. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей, если можно пренебречь потоками рассеяния, основан на применении законов непрерывности магнитного потока

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = \sum_i B_i S_i = \sum_i \Phi_i = 0$$

для каждого узла магнитной цепи (аналог 1-го закона Кирхгофа для электрической цепи) и полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_i H_i l_i = F_k$$

для каждого контура цепи (аналог 2-го закона Кирхгофа для электрической цепи). Здесь B_i — магнитная индукция, Тл; Φ_i — магнитный поток, Вб; S_i — площадь поперечного сечения, м^2 , для i -й ветви или участка; H_i — напряженность магнитного поля, А/м; l_i — средняя длина магнитной линии, м, i -й ветви или участка k -го контура;

$$F_k = \sum_m I_m w_m$$

— МДС k -го контура; I_m — ток, А, в катушке с w_m витками, которая входит в k -й контур. Положительные направления МДС и тока связаны правилом правого винта.

Между уравнениями магнитной цепи постоянного тока и нелинейной электрической цепи постоянного тока существует формальная аналогия. Аналогичные величины: магнитный поток Φ и ток I , магнитное напряжение $HI = U_m$ и напряжение U , МДС F и ЭДС E , магнитное сопротивление R_m и сопротивление R . Для неразветвленной (рис. 3.45, а) и разветвленной (рис. 3.45, б) магнитных цепей можно составить эквивалентные электрические цепи, приведенные на рис. 3.46, а и б.

Если зависимости $B(H)$, тем самым и $\Phi(U_m)$,

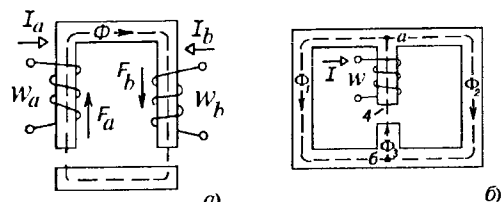


Рис. 3. 45

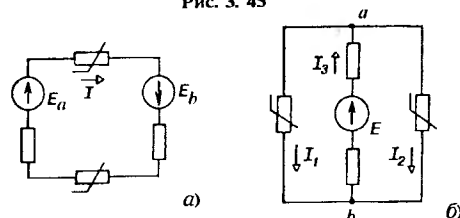


Рис. 3. 46

заданы, то расчет цепи может быть выполнен теми же методами, что и нелинейной резистивной цепи.

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В устройствах, содержащих магнитопроводы и катушки (обмотки), при синусоидальных напряжениях питания токи из-за нелинейности кривых намагничивания могут быть несинусоидальными (содержать высшие гармоники) и, наоборот, при синусоидальных токах могут быть несинусоидальными напряжения. Если влиянием высших гармоник можно пренебречь (их уровень невелик и их возникновение не является принципиально важным для работы устройства), то несинусоидальные величины заменяют эквивалентными синусоидальными. Применение эквивалентных величин дает возможность вести расчет комплексным методом.

Комплексное сопротивление какого-либо участка магнитной цепи

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu = \rho_R l/S + j\rho_X l/S,$$

где R_μ и X_μ — активное и реактивное (учитываясь потери) сопротивление участка, Гн^{-1} ; l и S — его средняя длина и площадь поперечного сечения; ρ_R и ρ_X — удельные активное и реактивное магнитные сопротивления материала, м/Гн . Зависимости $\rho_R(B)$ и $\rho_X(B)$, как и кривые намагничивания, определяются экспериментально для каждой марки стали или другого ферромагнитного материала, причем значения ρ_X зависят от частоты.

Расчеты магнитной цепи переменного тока выполняются теми же методами, что и при постоянном токе, но все величины в уравнениях по закону полного тока записываются в комплексной форме:

$$\dot{F}_k = \sum_i \dot{H}_i l_i = \sum_i \underline{Z}_{\mu i} \dot{\Phi}_i.$$

Рассчитаем МДС $F = F_a + F_b$ неразветвленной цепи по рис. 3.45, а при заданных размерах и материале магнитной цепи и требуемом действующем значении магнитного потока Φ . Магнитные индукции на участках $B_1 = \Phi_1/S_1$, $B_2 = \Phi_2/S_2$, $B_3 = \Phi_3/S_3$. Для участков из ферромагнитного материала при значениях B_1 и B_2 определяем по зависимостям $\rho_R(B)$ и $\rho_X(B)$ удельные активные и реактивные магнитные сопротивления ρ_{R1} , ρ_{X1} , ρ_{R3} , ρ_{X3} и магнитные сопротивления $\underline{Z}_{\mu 1}$ и $\underline{Z}_{\mu 3}$. Для воздушных зазоров магнитное сопротивление $R_2 = l_2/\mu_0 S_2$, где l_2 — суммарная длина воздушных зазоров.

Для этого случая комплексная МДС $F = (\underline{Z}_{\mu 1} + \underline{Z}_{\mu 3} + R_2) \Phi$, а модуль МДС

$$F = \sqrt{(R_{\mu 1} + R_{\mu 3} + R_2)^2 + (X_{\mu 1} + X_{\mu 3})^2}.$$

Так называемую обратную задачу — задана МДС, определяется магнитный поток — можно решить, например, методом последовательных приближений: задавать значения Φ и рассчитывать F , пока разница между заданным и полученным

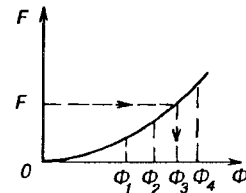


Рис. 3.47

значениями МДС не станет достаточно малой. В качестве первого значения Φ , при котором значение МДС получится меньше заданной, можно выбрать $\Phi_1 = F/R_2$, т. е. без учета магнитного сопротивления ферромагнитных участков. Число необходимых вычислений можно сократить, если построить зависимость $F(\Phi)$, как на рис. 3.47.

Для разветвленной симметричной магнитной цепи по рис. 3.45, б ($l_1 = l_2$, $S_2 = S_1$) при заданных размерах, материале и потоке в воздушном зазоре $\Phi_4 = \Phi_3$ нельзя непосредственно вычислить МДС F , как для неразветвленной цепи. Действительно, можно определить $B_3 = \Phi_3/S_3$, ρ_{R3} , ρ_{X3} , $\underline{Z}_{\mu 3}$. Магнитное напряжение между узловыми точками $\dot{U}_{м аб} = \dot{F} - (R_4 \dot{\Phi}_4 + \underline{Z}_{\mu 3} \dot{\Phi}_3)$, т. е. содержит две неизвестные величины: магнитное напряжение и МДС. Задачу можно решить методом последовательных приближений, задавая поток Φ_1 или Φ_2 . Последовательность вычислений: $\Phi_1 \rightarrow B_1 = \Phi_1/S_1 \rightarrow \rho_{R1}$, ρ_{X1} , $\underline{Z}_{\mu 1} \rightarrow U_{м аб} = \underline{Z}_{\mu 1} \dot{\Phi}_1$, $\dot{\Phi}_3 = \dot{\Phi}_4 = 2 \dot{\Phi}_1$.

Расчет повторяется до получения значения $\dot{\Phi}_4$, достаточно близкого к заданному. Затем определяем $\dot{B}_3 = \dot{\Phi}_3/S_3 \rightarrow \rho_{R3}$, ρ_{X3} , $\underline{Z}_{\mu 3}$ и $\dot{F} = \dot{U}_{м аб} + (R_4 \dot{\Phi}_4 + \underline{Z}_{\mu 3} \dot{\Phi}_3)$.

Аналогичен расчет при заданной МДС.

3.12. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

В общем случае нелинейные электрические цепи содержат не только линейные и нелинейные резистивные элементы, но и реактивные (индуктивные и емкостные) элементы. Нелинейные индуктивные и емкостные элементы описываются соответственно вебер-амперными и кулон-вольтными характеристиками

$$\Psi_j = \Psi_j(i_j), \quad q_k = q_k(u_k),$$

где Ψ_j и i_j — потокосцепление и ток j -го индуктивного элемента; q_k и u_k — заряд и напряжение k -го емкостного элемента. Для всех индуктивных и емкостных элементов можно записать матричные соотношения (нелинейные векторные функции)

$$\Psi = \Psi(i_L), \quad q = q(u_C),$$

где Ψ , i_L , q , u_C — векторы потокосцеплений,

индуктивных токов, зарядов и емкостных напряжений. Ниже предполагаем, что зависимости $\Psi(i_{Lj})$ и $q(u_{Ck})$ однозначны, а линейные индуктивные и емкостные элементы рассматриваются как частный случай нелинейных. Вместо приведенных зависимостей нелинейные реактивные элементы могут быть описаны матрицами дифференциальных индуктивностей $L(i_L)$ и емкостей $C(u_C)$.

Расчет переходных процессов в нелинейных цепях — сложная задача, которая, как правило, может быть решена только численными методами; наиболее широко применяются метод переменных состояния и метод дискретных моделей.

Неявные методы интегрирования позволяют алгебраизировать уравнения индуктивных и емкостных элементов, в результате чего расчет переходных процессов сводится к решению множества систем алгебраических уравнений, описывающих схему в дискретные моменты времени. Например, применяя неявную формулу Эйлера для тока нелинейной индуктивности, получаем

$$i_{L,k+1} = i_{L,k} + h di_{L,k+1}/dt$$

или с учетом равенства $di_L/dt = u_L/L(i_L)$

$$u_{L,k+1} = L(i_{L,k+1})(i_{L,k+1} - i_{L,k})/h.$$

Поскольку зависимость дифференциальной индуктивности от тока $L(i_L)$ известна, приведенная формула определяет напряжение в момент времени t_{k+1} как функцию тока $i_{L,k+1}$ в тот же момент:

$$u_{L,k+1} = F_L(i_{L,k+1});$$

Эту функцию можно рассматривать как вольт-амперную характеристику резистивного нелинейного элемента, которым в дискретный момент времени t_{k+1} можно заменить нелинейную индуктивность $L(i_L)$.

Аналогично для нелинейного емкостного элемента с емкостью $C(u_C)$ получаем дуальное соотношение:

$$i_{C,k+1} = C(u_{C,k+1})(u_{C,k+1} - u_{C,k})/h$$

или

$$i_{C,k+1} = F_C(u_{C,k+1}).$$

Это соотношение также можно рассматривать как вольт-амперную характеристику резистивного нелинейного элемента, эквивалентного в дискретный момент времени t_{k+1} емкостному элементу $C(u_C)$.

Если вместо метода Эйлера применяется более точный метод трапеций, то изменяются лишь выражения для функций F_L и F_C :

$$F_L(i_{L,k+1}) = \frac{2}{h} L(i_{L,k+1}) \times \left[i_{L,k+1} - i_{L,k} - \frac{h}{2} \frac{di_{L,k}}{dt} \right];$$

$$F_C(u_{C,k+1}) = \frac{2}{h} C(u_{C,k+1}) \times \left[u_{C,k+1} - u_{C,k} - \frac{h}{2} \frac{du_{C,k}}{dt} \right].$$

Аналогичные выражения можно получить и для других методов неявного интегрирования.

Резистивные элементы с вольт-амперными характеристиками:

$$u_{L,k+1} = F_L(i_{L,k+1});$$

$$i_{C,k+1} = F_C(u_{C,k+1})$$

называются соответственно дискретными моделями нелинейных индуктивных и емкостных элементов. Заменяв в заданной схеме все реактивные элементы их дискретными моделями, получим резистивную дискретную модель этой схемы, описываемую системой нелинейных алгебраических уравнений.

Таким образом, расчет переходных напряжений и токов нелинейной схемы в моменты времени t_{k+1} сводится к расчету множества резистивных нелинейных схем — дискретных моделей. В начальный момент $t = 0$ индуктивные и емкостные элементы заменяются источниками тока $i_L(0)$ и напряжения $u_C(0)$, что также приводит к резистивной схеме. Поэтому методы анализа резистивных нелинейных схем (см. §3.7) служат основой расчета и переходных процессов при помощи дискретных моделей. Этот метод применим и для линейных цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 3.1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1984.
- 3.2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 1. Л.: Энергоиздат, 1981. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т. 2. Л.: Энергоиздат, 1981.
- 3.3. Основы теории цепей/ Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил и др. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 3.4. Теоретические основы электротехники. Т. 1. К.М. Поливанов М.: Энергия. 1972. Т. 2. Б.Я. Жуховицкий, И.Б. Негневицкий М.: Энергия, 1972. Т. 3. К.М. Поливанов М.: Энергия, 1975.
- 3.5. Теоретические основы электротехники/ Под ред. П.А. Ионкина. Т. 1. Основы теории линейных цепей. М.: Высшая школа, 1976. Т. 2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1976.
- 3.6. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч. III. Г.И. Атабеков. Линейные электрические цепи. М.: Энергия, 1978. Ч. II и III, Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев, С.С. Хухриков. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. М.: Энергия, 1979.
- 3.7. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969.
- 3.8. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Советское радио, 1976.

3.9. Демирчян К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. М.: Высшая школа, 1988.

3.10. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа, 1986.

3.11. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. Л.: Энергоатомиздат, 1990.

3.12. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. М.: Радио и связь, 1988.

3.13. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1986.

3.14. Чуа Л.О., Пен-Мин-Лин. Машинный анализ электронных схем. М.: Энергия, 1980.

3.15. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1990.

Раздел 4

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

СОДЕРЖАНИЕ

4.1. Основные уравнения электромагнитного поля	74	4.4. Красевая задача теории потенциала и методы ее решения	84
4.2. Статические и стационарные электрические поля	76	4.5. Переменные электромагнитные поля в проводящих средах	88
4.3. Статические и стационарные магнитные поля	80	Список литературы	90

4.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электромагнитные процессы в классических электротехнических устройствах математически описываются уравнениями электродинамики неподвижных или медленно движущихся сплошных сред, называемыми уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J}_{\text{ст}};$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t.$$

Первое уравнение описывает закон полного тока: вихрь напряженности магнитного поля $\mathbf{H}$ равен плотности полного тока, включающего ток проводимости $\mathbf{J}$, ток смещения $\partial \mathbf{D} / \partial t$ и сторонний ток $\mathbf{J}_{\text{ст}}$ (независимый от порождаемого им электромагнитного поля). Второе уравнение представляет математическую запись закона Фарадея: вихрь напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ равен изменению во времени вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$. Векторы электрического смещения $\mathbf{D}$, магнитной индукции $\mathbf{B}$ и плотности тока проводимости $\mathbf{J}$ зависят от напряженности электрического $\mathbf{E}$ и магнитного $\mathbf{H}$ полей, а также от электрических свойств среды, в которой рассматривается поле:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P};$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M};$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E},$$

где $\mathbf{P}$ — вектор поляризации среды; $\mathbf{M}$ — вектор намагниченности; σ — удельная электрическая проводимость среды.

Для изотропных линейных электрических сред:

$$\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \text{ и } \mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H},$$

где ϵ_r и μ_r — относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

В табл. 4.1 приведены ориентировочные значения параметров сред при медленном изменении воздействующих полей.

Уравнения для векторов $\mathbf{J}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$ следует дополнить уравнениями непрерывности:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\partial \rho / \partial t;$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho;$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Т а б л и ц а 4.1. Параметры ϵ_r , μ_r , σ материальных сред и веществ

Материальная среда (вещество)	ϵ_r	μ_r	σ , См/м
Воздух	1,000536	1,0000004	—
Ацетон	21	—	—
Вода дистиллированная	80	—	10^{-8}
Вода морская	80	—	0,5 — 4,0
Почва сухая	3—6	—	10^{-5} — 10^{-3}
Стекло	5—15	0,999987	10^{-11}
Янтарь	2,8	—	10^{-18}
Эбонит	4,0—4,5	1,000014	10^{-16}
Титанат бария	3000	—	—
Серебро	—	—	$6,2 \cdot 10^7$
Алюминий	—	—	$3,5 \cdot 10^7$
Медь	—	0,9999904	$5,8 \cdot 10^7$
Железо	—	500—1500	$1,0 \cdot 10^7$
Пермаллой	—	10 000—50 000	—
Нихром	—	—	$8,9 \cdot 10^5$

При этом первые два соотношения описывают закон сохранения заряда (ρ — объемная плотность заряда), а третье соотношение свидетельствует об отсутствии макроскопических магнитных зарядов.

Приведенная система уравнений справедлива для однородных сред. Для кусочно-неоднородных сред на границах раздела (поверхностях, на которых параметры $\epsilon_r, \mu_r, \sigma$ имеют разрыв) справедливы граничные условия. Если одна среда характеризуется параметрами $\epsilon_{r1}, \mu_{r1}, \sigma_1$, а другая — параметрами $\epsilon_{r2}, \mu_{r2}, \sigma_2, n^0$ — нормаль к поверхности раздела, направленная из первой среды во вторую, то для векторов электромагнитного поля справедливы условия:

$$(B_2 - B_1) n^0 = 0; \quad B_{2n} = B_{1n};$$

$$(D_2 - D_1) n^0 = q_s; \quad D_{2n} - D_{1n} = q_s;$$

$$(J_2 - J_1) n^0 = 0; \quad J_{2n} = J_{1n};$$

$$[n^0 \times (H_2 - H_1)] = v_l; \quad H_{2t} - H_{1t} = v_l;$$

$$[n^0 \times (E_2 - E_1)] = 0; \quad E_{2t} = E_{1t},$$

где q_s — поверхностная плотность заряда на границе раздела; v_l — линейная плотность поверхностного тока; $B_{1n}, B_{2n}, D_{1n}, D_{2n}, J_{1n}, J_{2n}$ — нормальные составляющие векторов; $H_{1t}, H_{2t}, E_{1t}, E_{2t}$ — тангенциальные составляющие векторов.

При решении уравнений Максвелла удобно записать их с помощью вспомогательных величин: векторного магнитного потенциала A и скалярного электрического потенциала φ . Электродинамические потенциалы A и φ для диэлектрической среды связаны с векторами поля выражениями:

$$\text{rot } A = B;$$

$$\text{div } A = -\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t};$$

$$-\text{grad } \varphi = E + \partial A / \partial t.$$

В новых обозначениях электродинамические уравнения имеют вид:

$$\nabla^2 A - \epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_r \mu_0 J;$$

$$\nabla^2 \varphi - \epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0},$$

где ∇ — дифференциальный оператор Гамильтона, который в декартовой системе координат (e_x, e_y, e_z) определяется как символический вектор $\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$.

Для расчета полей в элементах электротехнических устройств, представляющих собой сплошные тела, используется запись уравнений Максвелла в интегральной форме:

$$\int_L H dl = \int_S (J + \partial D / \partial t + J_{\text{CT}}) dS;$$

$$\int_L E dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int S B dS;$$

$$\int_S D dS = \int_V \rho dV; \quad \int_S J dS = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV;$$

$$\int_S B dS = 0.$$

При концентрации поля в определенных пространственных объемах записанные уравнения дают возможность перехода к интегральным величинам: току $i = \int_S J dS$, магнитному потоку

$$\Phi = \int_S B dS, \text{ напряжению } u_{12} = \int_1^2 E dl, \text{ а также}$$

формулировке уравнений электрических и магнитных цепей. Например, для неизменного во времени тока в проводнике получим $i = J S = \sigma \frac{S}{l} u = G u$ — закон Ома в интегральной форме. Если в какой-либо точке соединено несколько проводников, то из соотношения для вектора J следует, что $\sum_k i_k = 0$, т.е. алгебраическая сумма

токов во всех проводниках равна нулю (закон Кирхгофа для токов).

Для гармонически изменяющихся во времени электромагнитных полей (составляющие векторов электромагнитного поля E, H, J по осям координат описываются синусоидальными временными функциями одной частоты) уравнения Максвелла записывают в комплексной форме:

$$\text{rot } \dot{H}_m = \dot{J}_m + \dot{J}_m^{\text{CT}} + j\omega \dot{D}_m;$$

$$\text{rot } \dot{E}_m = -j\omega \dot{B}_m;$$

$$\text{div } \dot{B}_m = 0;$$

$$\text{div } \dot{D}_m = \dot{\rho}_m; \quad \text{div } \dot{J}_m = -j\omega \dot{\rho}_m,$$

где введены комплексные амплитуды векторов, например, $\dot{E}_m = e_x E_{xm} e^{j\alpha_x} + e_y E_{ym} e^{j\alpha_y} + e_z E_{zm} e^{j\alpha_z}$, которые связаны с функцией времени соотношением $E(t) = \text{Im}(\dot{E}_m e^{j\omega t})$; e_x, e_y, e_z — орты в декартовой системе координат; ω — частота гармонической функции; $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ — начальные фазы синусоидальных функций проекций вектора E на оси координат.

Электрофизические свойства линейной среды при переменном синусоидальном поле характеризуются комплексными значениями удельной электрической проводимости $\sigma(j\omega)$, относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r(j\omega)$, относительной магнитной проницаемости $\mu_r(j\omega)$. Тогда материальные уравнения принимают вид:

$$\dot{J}_m = \sigma(j\omega) \dot{E}_m; \quad \dot{D}_m = \epsilon_0 \epsilon_r(j\omega) \dot{E}_m;$$

$$\dot{B} = \mu_0 \mu_r(j\omega) \dot{H}_m.$$

Электромагнитное поле обладает энергией. Запас электромагнитной энергии в объеме V равен сумме энергий электрического и магнитного полей

$$W = W^{\text{Э}} + W^{\text{М}} = \frac{1}{2} \left[\int_V E D dV + \int_V H B dV \right].$$

Закон сохранения энергии в электромагнитном поле описывается теоремой Умова — Пойнтинга в интегральной форме:

$$-\oint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] d\mathbf{S} = \int_V \left[\mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] dV + \int_V \sigma \mathbf{E}^2 dV + \int_V \mathbf{J}_{\text{св}} \mathbf{E} dV.$$

Первый интеграл в правой части уравнения соответствует изменению энергии электромагнитного поля в объеме V , ограниченном поверхностью S , второй выражает мощность тепловых потерь в том же объеме, а третий учитывает энергию, отдаваемую полем сторонним источникам. Очевидно, что левая часть равенства представляет собой мгновенное значение мощности, выходящей из объема V через замкнутую поверхность S .

Для линейных изотропных сред при отсутствии сторонних источников теореме Умова — Пойнтинга описывает уравнение в дифференциальной форме:

$$-\operatorname{div} \Pi = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_r \epsilon_0 E^2/2 + \mu_r \mu_0 H^2/2) + \sigma E^2,$$

где $\Pi = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$ — вектор Пойнтинга.

Для гармонически изменяющихся во времени полей энергетические соотношения для комплексных величин записываются с учетом комплексных параметров среды $\underline{\epsilon} = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$, $\underline{\mu} = \mu_r' - j\mu_r''$ и без сторонних источников уравнение баланса энергии принимает вид:

$$-\int_S [\dot{\mathbf{E}} \times \dot{\mathbf{H}}] d\mathbf{S} = \left(\sigma \int_V E^2 dV + \epsilon_0 \epsilon_r'' \omega \int_V E^2 dV + \mu_0 \mu_r'' \omega \int_V H^2 dV \right) + j\omega \left(\mu_0 \mu_r' \int_V H^2 dV - \epsilon_0 \epsilon_r' \int_V E^2 dV \right).$$

В правой части уравнения первое слагаемое в скобках выражает мощность необратимых потерь внутри объема V , которая состоит из мощности тепловых потерь в диэлектрике и магнитных потерь; второе слагаемое учитывает реактивную мощность в том же объеме, т.е.

$$-\oint_S \Pi d\mathbf{S} = (P_T + P_\Sigma + P_M) + j\omega (Q_M - Q_\Sigma).$$

Электродинамические уравнения полностью описывают явления в электротехнических устройствах, но их решение связано со значительными математическими трудностями. В конкретных рассматриваемых устройствах можно пренебречь некоторыми эффектами и тогда система уравнений принимает более простые формы.

4.2. СТАТИЧЕСКИЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Электростатическая модель справедлива для элементов и устройств, в которых поле создается неподвижными в пространстве электрическими зарядами, изменяющимися во времени. Система уравнений Максвелла для линейной среды принимает вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0; \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho/\epsilon_r \epsilon_0.$$

Первое уравнение выражает потенциальный характер электростатических полей. Используя понятие скалярного электрического потенциала φ , который в рассматриваемом случае определяется как

$$-\operatorname{grad} \varphi = \mathbf{E},$$

записываем уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon_r \epsilon_0.$$

Одна из задач электростатики состоит в определении электрического поля по заданному распределению зарядов.

1. Поле объемного заряда. Если в линейной однородной изотропной среде задана объемная плотность распределенных зарядов $\rho(P)$, где P — точка истока, то потенциал в точке наблюдения M (рис. 4.1) описывается выражением

$$\varphi(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_V \frac{\rho(P)}{r} dV,$$

r — расстояние между точками M и P . Например, в декартовой системе координат $P(x_1, y_1, z_1)$, $M(x_2, y_2, z_2)$

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

2. Поле точечного заряда. Если заряд сосредоточен вблизи точки P в области V малой протяженности L , то на достаточно большом расстоянии $r \gg L$ получим:

$$\varphi(M) = q/4\pi\epsilon_r \epsilon_0 r,$$

q — полный заряд области V , называемый точечным зарядом относительно точки наблюдения.

Напряженность электрического поля точечного заряда:

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \frac{\mathbf{r}^0}{r^2},$$

где $\mathbf{r}^0$ — орт вектора $\mathbf{r}$ из точки истока P в точку наблюдения M . Если в поле точечного заряда q_1 поместить заряд q_2 , то сила их взаимодействия в соответствии с законом Кулона

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}^0.$$

3. Поле точечных зарядов. При наличии в линейной среде произвольно расположенных n точечных зарядов q_i поле рассчитывается по принципу наложения:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}.$$

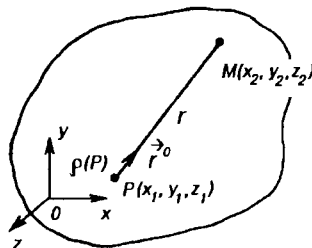


Рис. 4.1

4. Поле электрического диполя. Электрическим диполем называется пара расположенных на малом расстоянии l друг от друга одинаковых по модулю и противоположных по знаку зарядов q . В сферической системе координат (рис. 4.2) потенциал диполя в дальней зоне, т. е. на расстояниях $r \gg l$, определяется по формуле

$$\varphi = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2},$$

где $p = ql$ — электрический момент диполя.

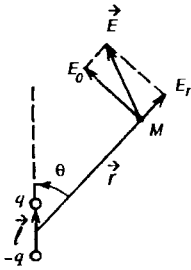


Рис. 4.2

5. Поле простого слоя поверхностных зарядов. Если на поверхности S (рис. 4.3) в однородной изотропной среде расположены заряды с поверхностной плотностью $\chi(P)$, то потенциал, созданный этими зарядами в произвольной точке M

$$\varphi(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_S \frac{\chi(P)}{r} dS.$$

Производная потенциала по направлению m , характеризуемому ортом e_m , для точек M вне поверхности S вычисляется по формуле

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial m} \right|_M = -\frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_S \chi(P) \frac{\cos \eta}{r^2} dS.$$

Очевидно, что полученная производная по модулю равна проекции составляющей вектора напряженности электрического поля на направление m .

На поверхности S нормальная производная потенциала простого заряженного слоя (нормальная составляющая напряженности поля) имеет разрыв $\Delta E = \frac{\chi(M)}{\epsilon_r \epsilon_0}$, т. е. производная простого слоя в точке наблюдения M_+ на поверхности S

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{M_+} = \frac{\chi(M)}{2\epsilon_r \epsilon_0} - \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_S \chi(P) \frac{\cos \eta}{r^2} dS.$$

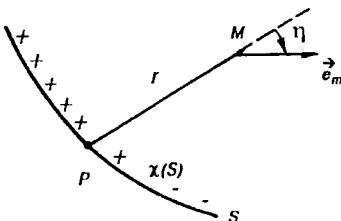


Рис. 4.3

6. Поле двойного слоя зарядов. Двойным заряженным слоем называются две параллельные, лежащие на малом расстоянии δ разноименно заряженные поверхности с поверхностной плотностью заряда $\chi(P)$. Элемент двойного слоя зарядов (рис. 4.4, а) можно рассматривать как диполь с моментом $dp = \chi(P) \delta dS e_n$, где dS — элемент поверхности, e_n — орт нормали в точке истока, $\chi(P) \delta = \nu(P)$ — плотность момента.

Потенциал, созданный двойным слоем зарядов в произвольной точке M вне поверхности S (рис. 4.4, б), определяется из соотношения:

$$\varphi(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_S \nu(P) \frac{\cos \theta}{r^2} dS.$$

В точках поверхности потенциал имеет разрыв, т. е. его значения с разных сторон поверхности отличаются на

$$\varphi(M_+) - \varphi(M_-) = \frac{\nu(M)}{\epsilon_r \epsilon_0}.$$

Если точка наблюдения M находится на поверхности S , то

$$\varphi(M_+) = \frac{\nu(M)}{2\pi\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \int_S \nu(P) \frac{\cos \theta}{r^2} dS.$$

Производная потенциала по направлению нормали к поверхности (нормальная составляющая вектора E) на поверхности не терпит разрыва. Если $\nu = \text{const}$, то соотношение для $\varphi(M)$ упрощается:

$$\varphi(M) = \frac{\nu}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \Omega,$$

где Ω — телесный угол, под которым поверхность S видна из точки наблюдения M .

Важной практической задачей электростатики является расчет интегральных величин, характеризующих систему заряженных тел (заряды, потенциалы), и коэффициентов пропорциональности между ними. Если в однородной линейной среде известно расположение заряженных проводящих тел, то их потенциалы пропорциональны суммарным зарядам:

$$\varphi_l = \sum_{k=1}^n \alpha_{lk} q_k, \quad l = \overline{1, n},$$

Входящие в это равенство величины α_{ll} называются собственными потенциальными коэффициентами и α_{lk} — взаимными потенциальными

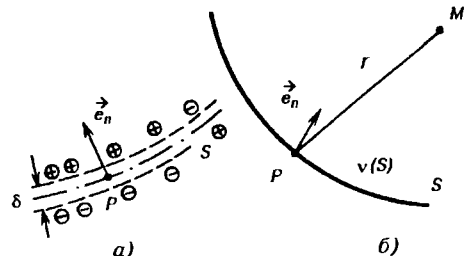


Рис. 4.4

коэффициентами. Если известны потенциалы тел, то соотношение принимает вид:

$$q_m = \sum_{l=1}^n \beta_{ml} \varphi_l, \quad m = \overline{1, n},$$

где β_{ml} — коэффициенты электрической индукции (емкостные).

Для потенциальных и емкостных коэффициентов выполняется правило взаимности: $\alpha_{lk} = \alpha_{kl}$ и $\beta_{ml} = \beta_{lm}$, причем все собственные потенциальные и емкостные коэффициенты положительны ($\alpha_{ll} > 0$, $\beta_{mm} > 0$), а взаимные — отрицательны ($\alpha_{lk} < 0$, $\beta_{mk} < 0$).

Уравнение для зарядов q_m можно записать и через разности потенциалов между всеми телами:

$$q_m = C_{mm} \varphi_m + \sum_{k=1}^n C_{mk} (\varphi_m - \varphi_k), \quad m = \overline{1, n},$$

где $C_{mm} = \sum_{k=1}^n \beta_{mk}$ — собственная частичная

емкость проводника, $C_{mk} = -\beta_{mk}$ — взаимная частичная емкость. Последняя система уравнений позволяет построить схему замещения (рис. 4.5, а). В частном случае единственного проводящего тела $q = C_0 \varphi$, где C_0 — емкость уединенного проводника.

При наличии двух проводников (рис. 4.5, б), имеющих одинаковые и противоположные по знаку заряды: $q_1 = +q$; $q_2 = -q$ (конденсатор), вводится емкость

$$C = \left| \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \right|,$$

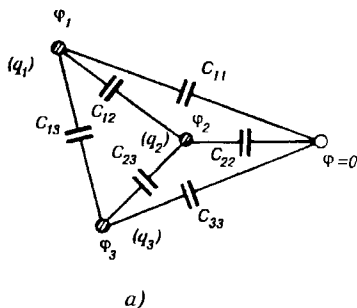
причем

$$C = C_{12} + C_{11} C_{22} / (C_{11} + C_{22}).$$

С учетом того, что в электростатике заряды располагаются на поверхности проводников, для определения емкостей можно записать выражения потенциала в произвольной точке M одного из проводников

$$\varphi_l(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_0} \sum_{k=1}^n \int_{S_k} \frac{\chi(S)}{r(P_l, P_k)} dS$$

и зарядов на проводнике



а)

$$q_k = \int_{S_k} \chi(S) dS.$$

Ввиду сложности расчета емкостей прямыми методами широкое распространение нашли приближенные.

Метод средних потенциалов основан на предположении, что заряды на поверхности каждого тела распределены с одинаковой плотностью, а потенциалы в точках тела различны. Потенциал тела принимается равным среднему значению

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{S} \int_S \varphi(M) dS.$$

Емкость двух проводников, имеющих поверхности S_1 и S_2 , находится по формуле:

$$C = 4\pi\epsilon_r \epsilon_0 \left(\frac{1}{S_1^2} \int_{S_1} dS' \int_{S_1} \frac{dS''}{r_{11}} - \frac{2}{S_1 S_2} \int_{S_1} dS' \int_{S_2} \frac{dS''}{r_{12}} + \frac{1}{S_2^2} \int_{S_2} dS' \int_{S_2} \frac{dS''}{r_{22}} \right),$$

где r_{11} , r_{22} — расстояния между точками одного и того же проводника; r_{12} — расстояние между точками различных проводников.

Выражения для емкостей систем проводящих тел приведены в табл. 4.2. Полученные соотношения носят приближенный характер и могут использоваться только при заданных конфигурациях тел. Более подробные материалы о методах расчета электрической емкости можно найти в справочнике [4.10].

Энергия электростатического поля заряженных проводящих тел

$$W^0 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n q_k \varphi_k.$$

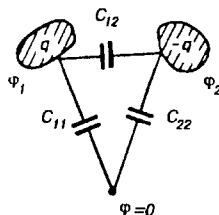
В электростатическом поле на проводник действует механическая (пондеромоторная) сила, являющаяся суммой всех сил, действующих на элементарные заряды:

$$\mathbf{F} = -\text{grad } W^0.$$

Электрическое поле и распределение неизменного во времени тока в среде с конечной проводимостью (стационарное электрическое поле) описываются системой уравнений:

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0; \quad \text{div } \mathbf{J} = 0; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}.$$

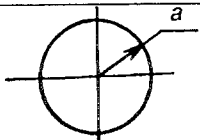
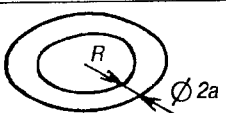
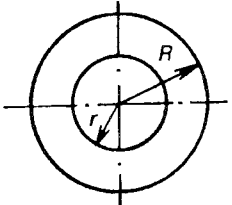
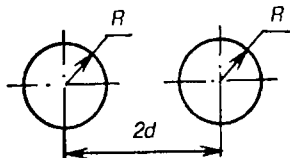
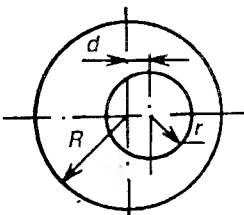
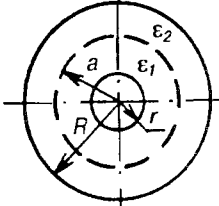
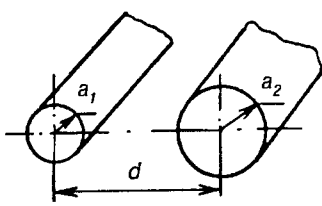
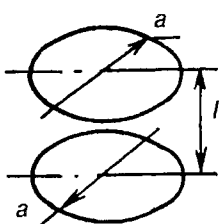
Данный вид электромагнитного поля может



б)

Рис. 4. 5

Т а б л и ц а 4.2

Уединенная сфера		$C_0 = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a$
Уединенный провод в форме кольца		$C_0 = \frac{4\pi^2\epsilon_r\epsilon_0 R}{\ln(8R/a)}$
Концентрические сферы		$C = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 \frac{rR}{R-r}$
Две некасающиеся сферы одинакового размера		$C = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 R \operatorname{sh} \beta \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\operatorname{sh} k \beta},$ $\beta = \operatorname{Arch} \frac{d}{R}$
Параллельные цилиндрические проводники, охватывающие друг друга (погонная емкость)		$C_l = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\operatorname{Arch} \frac{R^2 + r^2 - d^2}{2Rr}};$ $C_l = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}}, \quad d = 0$
Коаксиальный кабель с двухслойной изоляцией (погонная емкость)		$C_l = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{a}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{a}}$
Два провода кругового сечения (погонная емкость)		$d/a_1 \geq 5; \quad d/a_2 \geq 5$ $C_l = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 / \ln \frac{d^2}{a_1 a_2}$
Два коаксиальных диска одинакового размера (плоский конденсатор с круглыми пластинами)		$0,4 \leq l/a \leq 2,5$ $C = 4\epsilon_r\epsilon_0 a^2 \left(\frac{\pi}{4} \frac{a}{l} + 1 \right)$

быть описан с помощью скалярного электрического потенциала, который удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi = 0.$$

Очевидно, что электростатические и стационарные электрические поля описываются идентичными уравнениями, что говорит о формальной математической аналогии описания полей. Решение для электростатических полей (распределение потенциалов и зарядов в системе проводящих тел) можно интерпретировать для электрических полей в проводящих средах при идентичных граничных условиях. При этом необходимо в формулах произвести замену следующих величин: $\mathbf{D} \Rightarrow \mathbf{J}$; $\epsilon_r \epsilon_0 \Rightarrow \sigma$, $q \Rightarrow I$.

Например, погонную проводимость утечки на единицу длины двухпроводной линии в проводящей среде можно записать на основе формулы емкости проводов круглого сечения (см. табл. 4.2) при $a_1 = a_2 = a$

$$G_l = 4\pi\sigma / \ln(d/a).$$

Аналогия уравнений электростатических и стационарных полей предоставляет широкие возможности для экспериментального исследования трехмерных электростатических полей путем их моделирования в растворах электролитов, в которых можно измерить значение потенциала в любой точке пространства.

4.3. СТАТИЧЕСКИЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Неизменное во времени магнитное поле может создаваться либо постоянными токами в неподвижных в пространстве проводниках, либо постоянными магнитами. Магнитное поле постоянных токов описывается системой уравнений:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad \text{div } \mathbf{B} = 0; \quad \mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}.$$

В общем случае неизменное во времени магнитное поле не является потенциальным.

Для областей пространства, где отсутствует ток проводимости $\mathbf{J} = 0$, поле вектора $\mathbf{H}$ является потенциальным, так как $\text{rot } \mathbf{H} = 0$. Такое поле может быть описано скалярным магнитным потенциалом, определяемым из выражения:

$$-\text{grad } \Psi = \mathbf{H}.$$

Если рассматриваемая область заполнена линейной изотропной средой и $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$, то скалярный магнитный потенциал подчиняется уравнению Лапласа:

$$\nabla^2 \Psi = 0.$$

Соотношения, характеризующие статические магнитные поля, аналогичны уравнениям, описывающим электростатические поля при отсутствии объемного заряда. Указанная формальная аналогия позволяет при идентичных граничных условиях в расчете магнитных полей воспользоваться решениями соответствующих задач электростатики. Например, задача расчета магнитного поля, образованного произвольным контуром из тонкого

провода с постоянным током I (рис. 4.6), аналогична электростатической задаче определения потенциала двойного заряженного слоя с постоянной плотностью дипольного момента. При замене электрических величин соответствующими магнитными решение имеет вид:

$$\Psi = \frac{I}{4\pi} \Omega; \quad \mathbf{H} = -\frac{I}{4\pi} \text{grad } \Omega,$$

где Ω — телесный угол, под которым контур виден из точки наблюдения.

Магнитный диполь представляет собой контур площадью S с током I для точек наблюдения, расстояние от которых r от контура значительно превышает максимальный линейный размер контура. Если ввести понятие момента диполя $\mathbf{p}_m = I \mathbf{S}$, причем $\mathbf{S} = \mathbf{e}_n S$, то предельным переходом из предыдущей формулы получается выражение:

$$\Psi = \mathbf{p}_m \cdot \mathbf{r}^0 / (4\pi r^2),$$

которое с точностью до обозначений совпадает с формулой для потенциала электрического диполя.

В общем случае стационарное магнитное поле рассчитывается с помощью векторного магнитного потенциала $\mathbf{A}$, определяемого соотношениями

$$\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{B}; \quad \text{div } \mathbf{A} = 0,$$

для которого справедливо уравнение Пуассона,

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_r \mu_0 \mathbf{J}.$$

По аналогии со скалярным уравнением Пуассона решение этого уравнения при известном распределении плотности тока $\mathbf{J}$ имеет вид:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \int_V \mathbf{J} \frac{dV}{r}.$$

Если ток локализован в тонком проводе (рис. 4.7), то для векторного магнитного потенциала

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_r \mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\mathbf{l}}{r},$$

где $d\mathbf{l}$ — элемент провода длиной dl , совпадающий по направлению с осью провода в окрестности точки истока.

Напряженность магнитного поля контура с током вычисляется в соответствии с законом Био—Савара:

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0]}{r^2}.$$

Для двух параллельных бесконечно длинных

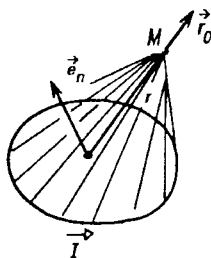


Рис. 4. 6

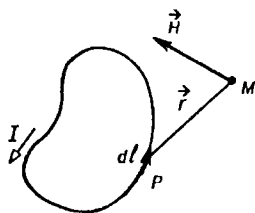


Рис. 4. 7

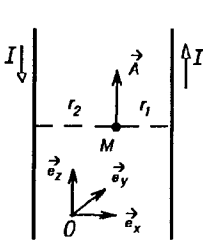


Рис. 4.8

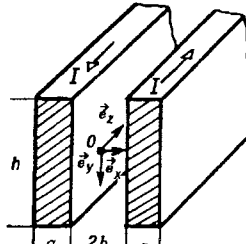


Рис. 4.9

проводов с противоположно направленными токами (рис. 4.8) векторный потенциал имеет z-составляющую:

$$A_z = \mu_r \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

а составляющие напряженности:

$$H_x = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad H_y = -\frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{\partial A_z}{\partial x}.$$

Если в качестве проводников используются параллельные медные шины (рис. 4.9), то при условии $h \gg 2b \gg a$ выражение составляющей векторного потенциала для $x > 0$ имеет вид:

$$\frac{s_{ш}}{\mu_r \mu_0 I} A_z = \begin{cases} ax, & b > x > 0; \\ (-x^2/2 + (a+b)x - b^2/2), & b+a > x > b; \\ a(a+2b)/2, & x > a+b, \end{cases}$$

где $s_{ш} = ah$ — площадь поперечного сечения шины.

Векторный потенциал кругового витка (рис. 4.10) радиусом R_0 с током I , находящегося в плоскости xOy , имеет только α -составляющую:

$$A_\alpha = \frac{\mu_r \mu_0 I}{k} \left(\frac{R_0}{\rho} \right)^{1/2} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) - E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) \right],$$

$$\text{где } k^2 = \frac{4\rho R_0}{(R_0 + \rho)^2 + z^2}.$$

Здесь $F\left(\frac{\pi}{2}, k\right)$ и $E\left(\frac{\pi}{2}, k\right)$ — полные эллиптические интегралы первого и второго рода:

$$F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta}};$$

$$E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \beta} d\beta,$$

для которых существуют подробные таблицы.

Магнитное поле произвольной катушки с осевой симметрией (рис. 4.11) получается по принципу наложения с использованием формулы для напряженности магнитного поля на оси кольцевого проводника с током I :

$$H_z(z) = \frac{I}{2} \frac{R_0^2}{(R_0^2 + z^2)^{3/2}};$$

в следующей форме:

$$H(z) = \frac{nI}{2} \int_0^H dh \int_{R_i(h)}^{\text{Re}(h)} \frac{R^2 dR}{[R^2 + (z-h)^2]^{3/2}}.$$

С помощью векторного магнитного потенциала можно рассчитать интегральную величину, характеризующую магнитное поле, т. е. магнитный поток Φ .

Полный магнитный поток, сцепленный с контуром из линейного проводника (размеры поперечного сечения проводника пренебрежимо малы по сравнению с длиной), выражается через циркуляцию

$$\Phi = \oint_l A dl.$$

Магнитный поток определяет важные интегральные параметры линейной электрической цепи — коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции:

$$M_{12} = \Phi_{2M} / I_1; \quad M_{21} = \Phi_{1M} / I_2; \quad L = \Phi_L / I,$$

т. е. отношения полных сцепленных потоков к вызвавшим их токам. В контурах из проводников конечного сечения s токи разбивают на нити тока (рис. 4.12) и находят поток Φ , сцепленный с каждой из нитей, а затем полный поток

$$\Phi_{12} = \frac{1}{I_1} \int_{s_1} \Phi dI_1 = \frac{1}{s_1} \int_{s_1} \Phi ds_1.$$

Общее выражение для взаимной индуктивности

$$M_{21} = M_{12} = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi I_1 I_2} \int_{V_1} \int_{V_2} J_1 J_2 \frac{dV_1 dV_2}{r},$$

где r — расстояние между элементами объемов.

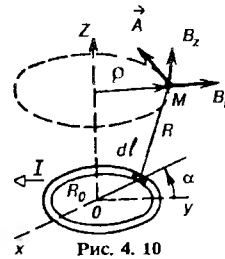


Рис. 4.10

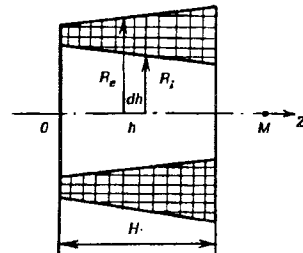


Рис. 4.11

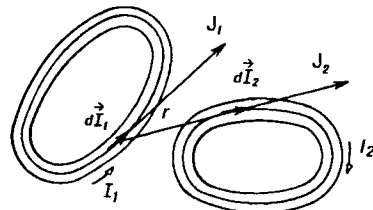
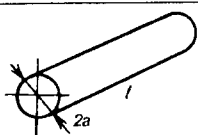
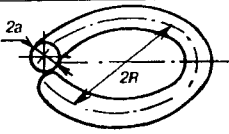
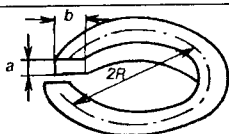
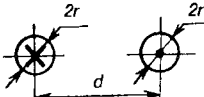
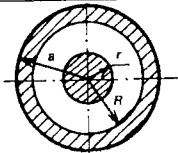
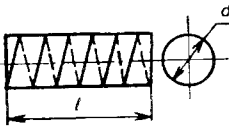
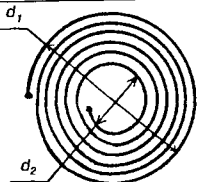
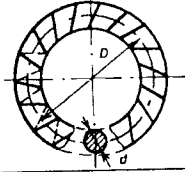
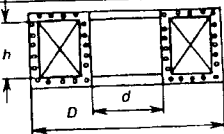
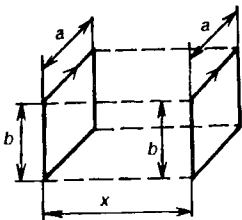


Рис. 4.12

Т а б л и ц а 4.3

Прямолинейный провод круглого сечения		$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - \frac{3}{4} + \frac{128}{45\pi} \frac{a}{l} - \frac{a^2}{4l^2} \right),$ при $a \ll l$ $L \approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - \frac{3}{4} \right)$
Кольцо из провода круглого сечения		$L = \mu_0 R \left[\ln \frac{8R}{a} - \frac{7}{4} + \frac{a^2}{8R^2} \left(\ln \frac{8R}{a} + \frac{1}{3} \right) \right]$
Кольцо из провода прямоугольного сечения		$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{a+b} - 0,5 \right),$ $a \ll R, b \ll R$
Двухпроводная линия (погонная индуктивность)		$L_l = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right)$
Коаксиальный кабель (погонная индуктивность)		$L_l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{R}{r} + \left[\frac{a^4}{(a^2 - R^2)^2} \ln \frac{a}{R} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{a^2 - R^2} \right] \right\}$
Цилиндрическая катушка с однослойной сплошной намоткой из n витков (соленоид)		$L = \frac{\mu_0 n^2}{4\pi} d\Phi;$ $\Phi = \frac{\pi^2}{\alpha} \left[1 - \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{8} \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{64} \frac{1}{\alpha^4} \right],$ $\alpha = l/d, \alpha \gg 1$
Дисковая (спиральная) катушка, имеющая n витков		$L = \frac{\mu_0 n^2}{8\pi} d\Psi$ $d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \rho = \frac{d_1 - d_2}{d_1 + d_2} > 0,5$ $\Psi = \frac{(1+\rho)^3}{\rho^2} \left(1,74 + 3,29 \frac{(1-\rho)^3}{(1+\rho)^3} \ln \frac{(1-\rho)}{(1+\rho)} \right)$
Тороидальная катушка с тонкой сплошной обмоткой из n витков		$L = \frac{\mu_0 n^2}{2} \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}}$
Кольцевая катушка с тонкой сплошной обмоткой из n витков		$L = \frac{\mu_0 n^2}{2\pi} h \ln (D/d)$
Два коаксиальных прямоугольных контура		$M = \frac{\mu_0}{\pi} \left[a \ln \left(\frac{a+d_1}{a+D} \frac{d_2}{x} \right) + \right.$ $\left. + b \ln \left(\frac{b+d_2}{b+D} \frac{d_1}{x} \right) + 2(D-d_1-d_2+x) \right]$ $d_1 = \sqrt{a^2 + x^2}; d_2 = \sqrt{b^2 + x^2}; D = \sqrt{a^2 + b^2 + x^2}$

Окончание табл. 4.3

Две параллельные линии (погонная взаимная индуктивность)		$M_l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_{13} d_{24}}{d_{14} d_{23}}$
Две тонкие катушки с n_1 и n_2 витками на кольцевом каркасе		$M = \frac{\mu_0}{2\pi} n_1 n_2 h \ln (D/d)$

Собственная индуктивность вычисляется из соотношения:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi I^2} \int_V \int_V \mathbf{J}' \mathbf{J}'' \frac{dV' dV''}{r},$$

где r — расстояние между элементами dV' и dV'' проводника.

Выражение для взаимной индуктивности упрощается для контуров из линейных проводников

$$M_{21} = \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{r}.$$

Приведенные выражения для индуктивностей контуров служат основой приближенных методов расчета и их численной реализации. Широко распространенным является метод участков, состоящий в том, что контуры сплошной формы разбивают на участки и суммируют. Выражение для взаимной индуктивности

$$M_{21} = \sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^n \frac{\mu_r \mu_0}{4\pi} \int_{l_{1k}} \int_{l_{2p}} \frac{dl_1 dl_2}{r},$$

где l_{1k} и l_{2p} — длины k -го участка первого контура и p -го участка второго контура.

Формулы для определения собственной и взаимной индуктивностей проводников и катушек приведены в табл. 4.3. Они справедливы при постоянных или медленно изменяющихся токах (низких частотах), когда можно не учитывать неравномерность распределения тока и магнитного потока по сечению проводника.

Все формулы относятся к системе проводников, для которых относительная магнитная проницаемость $\mu_r = 1$. Если проводник имеет $\mu_r \neq 1$, то индуктивность целесообразно разделить на внешнюю и внутреннюю, причем для последней учесть значение μ_r . Например, для индуктивности прямого провода запишем:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + L_i,$$

где $L_i = \mu_0 \mu_r l / (8\pi)$ — внутренняя индуктивность провода.

В таблице в основном приведены приближенные выражения и поэтому следует учитывать ограничения. Более полный материал по расчету индуктивности имеется в справочнике [4.9].

Энергия магнитного поля в замкнутом объеме V , ограниченном поверхностью S , может быть выражена через основные векторы

$$W^M = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \mathbf{B} dV$$

или с помощью векторного магнитного потенциала

$$W^M = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{J} \mathbf{A} dV + \frac{1}{2} \oint_S [\mathbf{A} \times \mathbf{H}] dS.$$

Последние выражения можно упростить с учетом того, что на больших расстояниях от контуров с токами произведение $[\mathbf{A} \times \mathbf{H}]$ убывает пропорционально третьей степени расстояния, а площадь поверхности увеличивается не быстрее квадрата расстояния. Поэтому второй интеграл можно принять равным нулю и тогда

$$W^M = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{J} \mathbf{A} dV.$$

Для двух контуров с токами I_1 и I_2 энергия магнитного поля может быть представлена в виде суммы трех слагаемых

$$W^M = L_1 I_1^2 / 2 + L_2 I_2^2 / 2 + M_{12} I_1 I_2,$$

где первые два слагаемых выражают собственную магнитную энергию каждого контура, третье слагаемое — их взаимную энергию

$$W_{12}^M = M_{12} I_1 I_2 = \int_V \mathbf{H}_1 \mathbf{B}_2 dV = \int_V \mathbf{J}_1 \mathbf{A}_2 dV.$$

На заряд q , движущийся со скоростью $\mathbf{v}$ в магнитном поле, действует сила

$$\mathbf{F} = q [\mathbf{v} \times \mathbf{B}].$$

Сила, действующая на неподвижный проводник с неизменной во времени плотностью тока $\mathbf{J}$, равна

$$\mathbf{F} = \int_V [\mathbf{J} \times \mathbf{B}] dV,$$

а на линейный неподвижный проводник с током I

$$\mathbf{F} = I \int_l [d\mathbf{l} \times \mathbf{B}].$$

Расчет механических сил, при наличии движущихся проводников с током базируется на законе сохранения энергии. Если в системе индуктивно связанных контуров один из них переместился вдоль координаты ξ на $d\xi$, то при неизменном потоке Φ , сцепленном с контуром, выражение $\mathbf{F} = (\partial W^M / \partial \xi) \xi^0$ можно рассматривать как

обобщенное понятие силы. Очевидно, что при изменении магнитного потока, сцепленного с контуром или тока в нем, баланс энергий следует составлять с учетом изменений.

4.4. КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

На практике задача расчета статических и стационарных электрических и магнитных полей ставится как краевая задача. При этом бывает задано пространственное расположение проводящих тел и значения их потенциалов (или суммарных зарядов, или токов). Требуется определить потенциалы и векторы поля во всех точках пространства. Рассматриваемые поля описываются уравнениями Пуассона (или Лапласа) с использованием либо векторного A , либо скалярного ϕ потенциалов. Уравнение Пуассона для векторного потенциала в большинстве случаев удается разделить на три скалярных уравнения для компонент. Таким образом, в общем случае требуется решить одно или несколько скалярных уравнений Пуассона (или Лапласа)

$$\nabla^2 \phi = -\xi,$$

где ξ — известная функция координат (для уравнения Пуассона), $\xi = 0$ (для уравнения Лапласа).

Эти уравнения имеют множество решений.

Для получения единственного решения необходимо сформулировать и записать уравнения, характеризующие распределение потенциала и его градиента на границе рассматриваемой однородной области. При решении задач, содержащих несколько различных сред, требуется записать общие решения для каждой однородной среды и затем потребовать выполнения граничных условий на разделяющих поверхностях. Определение потенциала внутри замкнутой области с заданными граничными условиями носит название внутренней краевой задачи. Если граница является незамкнутой (открытой) и поле может распространяться на бесконечную область, то краевая задача является внешней. При рассмотрении решения внешней краевой задачи необходимо учесть условия убывания потенциала

$$\phi(r) \sim 1/r; \quad \partial\phi/\partial r \sim 1/r^2$$

при бесконечном увеличении координаты r .

В зависимости от постановки задачи используются следующие граничные условия:

а) Дирихле, когда известно распределение потенциала на границе

$$\phi(S) = f_1(S);$$

б) Неймана, когда задано распределение пространственной производной потенциала $\partial\phi/\partial n$ по направлению нормали к поверхности границы S

$$\partial\phi_S/\partial n = f_2(S);$$

в) смешанные

$$\phi_S + k \frac{\partial\phi_S}{\partial n} = f_3(S),$$

где k — заданная постоянная, имеющая размерность длины.

Для определенности решения внутренней задачи в двух последних случаях следует учесть условие электронеutrальности

$$\int_S (\partial\phi/\partial n) dS = 0.$$

При решении краевой задачи применяются аналитические и численные методы. Непосредственно аналитические методы дают решения в замкнутой форме только при анализе простых краевых задач.

Метод зеркальных изображений применяется для расчета электрических (магнитных) полей точечных зарядов (токов) при наличии простой границы области. При этом можно подобрать такую систему зарядов (токов) вне исследуемой области, что их действие обеспечивает граничные условия.

Например:

1. Поле точечного заряда q , расположенного вблизи плоской границы раздела двух диэлектриков с ϵ_1 и ϵ_2 (рис. 4.13, а), определяется отдельно для каждого диэлектрика. Поле в диэлектрике с ϵ_1 эквивалентно полю пары зарядов: действительного q и фиктивного $q_1 = q(\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ в предположении, что все пространство заполнено однородной средой с проницаемостью ϵ_1 (рис. 4.13, б). Поле в диэлектрике с ϵ_2 эквивалентно полю заряда $q_2 = 2q\epsilon_2/(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ в однородной среде с ϵ_2 (рис. 4.13, в). Если заряд находится над плоской проводящей поверхностью, то фиктивный заряд $q_1 = -q$, а электростатическое поле в проводнике отсутствует.

2. Поле заряженной с линейной плотностью τ оси, которая расположена параллельно оси диэлектрического цилиндра с ϵ_1 , находящегося в диэлектрике с ϵ_2 (рис. 4.14, а), эквивалентно полю двух заряженных осей в среде ϵ_1 с плотностями заряда τ и $\tau_1 = \tau \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$ для области внутри цилиндра

(рис. 4.14, б) или полю двух заряженных осей с плотностями τ_1 и $\tau_2 = 2\epsilon_2\tau/(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ (рис. 4.14, в)

3. Поле провода с током I , расположенного в проводящей среде параллельно плоской границе раздела с диэлектриком (рис. 4.15), эквивалентно полю двухпроводной линии с токами I в проводящей среде.

Очевидно, что метод применим к узкому кругу задач при возможности простого описания геометрии тел и границ раздела в одной и той же системе координат.

Метод конформных отображений (преобразований) применяется для плоскопараллельных полей, в которых потенциал зависит только от двух координат $\phi(x, y)$. Основой метода является конформное (с сохранением значений углов между двумя прямыми) отображение комплексной плоскости $z = x + jy$ на плоскость $w = u + jv$ с помощью аналитической функции $w = f(z)$.

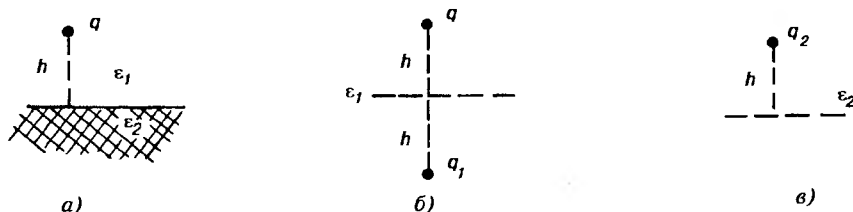


Рис. 4.13

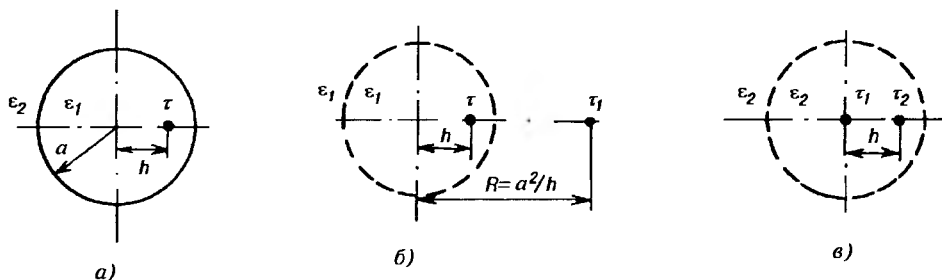


Рис. 4.14

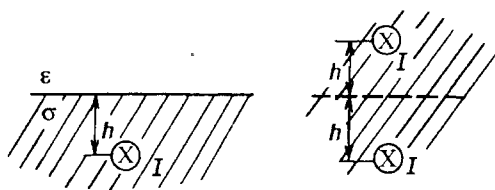


Рис. 4.15

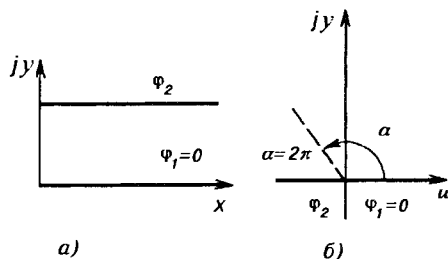


Рис. 4.16

Такое преобразование является инвариантным по отношению к уравнению Лапласа. При конформном преобразовании потенциалы и заряды электродов не изменяются. Следовательно, подбираются такие аналитические функции, которые дают достаточное приближение к решению поставленной задачи, т. е. отыскивается такое преобразование, которое известное поле в плоскости w преобразует в плоскости z в поле, имеющее эквипотенциалы, совпадающие с формой и потенциалами заданных электродов. Например, если в преобразовании с помощью функции

$$w = \ln z = \ln R e^{j\alpha} = \ln R + j\alpha = u + jv$$

выбрать в качестве функции потенциала функцию u , которая при $u_1 = \varphi_1$ и $u_2 = \varphi_2$ описывает поле двух параллельных плоскостей (рис. 4.16, а), то в плоскости

$$\varphi = u = \arctg(y/x)$$

получим поле двух полуплоскостей, образующих угол α и имеющих потенциалы φ_1 и φ_2 (рис. 4.16, б).

Ограничение метода связано с отсутствием регулярных способов поиска преобразующих функций в общем случае. При сложных формах электродов пользуются кусочно-линейной аппроксимацией с последующим применением интеграла Кристоффеля—Шварца, который дает отображе-

ние n -угольника в плоскости z на верхнюю полуплоскость w .

Метод функции Грина состоит в предварительном отыскании для заданной краевой задачи вспомогательной функции G . Функция Грина G для заданной поверхности представляет собой распределение потенциала в объеме v , ограниченном поверхностью S нулевого потенциала (рис. 4.17), причем в точке P (внутри объема) расположен единичный заряд. Очевидно, что определение функции Грина требует решения дополнительной краевой задачи, которая для некоторых форм границ решена. В общем случае она обычно является более простой, чем основная краевая задача.

Если функция Грина определена, то решение более сложной задачи сводится к расчету интегралов, которые имеют следующий вид для различной постановки задачи:

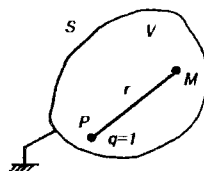


Рис. 4.17

1) внутри проводящей поверхности S , имеющей нулевой потенциал, распределен заряд с объемной плотностью ρ

$$\varphi_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} \int_V \rho r dV;$$

2) заряды в объеме отсутствуют, а на поверхности задано распределение потенциала φ_S (задача Дирихле)

$$\varphi_M = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \varphi_S \frac{\partial G}{\partial n} dS;$$

3) заряды в объеме отсутствуют, а на поверхности задана нормальная производная потенциала $\partial\varphi_S/\partial n$ (задача Неймана)

$$\varphi_M = -\frac{1}{4\pi} \oint_S G \frac{\partial\varphi_S}{\partial n} dS.$$

Аналогично можно найти решение и внешней краевой задачи, если наложить на функцию Грина ограничения на бесконечности.

Метод разделения переменных (метод Фурье) заключается в том, что решение уравнения Лапласа представляется в виде произведения частных решений

$$\varphi = F_1(x_1)F_2(x_2)F_3(x_3),$$

где x_1, x_2, x_3 — координаты в выбранной системе, например, в прямоугольной системе координат $x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z$.

Такое представление (разделение переменных) допускается в большинстве используемых координатных систем. Для каждой функции $F_i(x_i)$, $i = 1, 2, 3$ записывается обыкновенное дифференциальное уравнение, содержащее параметр разделения. Граничные условия накладывают ограничения на допустимые значения параметра разделения (собственные значения) и вид функций F_i (собственные функции). Собственные значения и собственные функции можно определить при однородных краевых условиях на границе изменения координаты $x_i \in [a_i, b_i]$, т.е. $F_i(a_i) = F_i(b_i) = 0$ или $F'(a_i) = F'(b_i) = 0$. Такие условия наиболее просто записываются, когда границы области в исходной краевой задаче совпадают с координатными поверхностями и для одной из координат на них заданы однородные краевые условия.

Решение поставленной задачи ищется в виде суммы ряда, составленного из частных решений, т.е. собственных функций задачи

$$\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} C_n F_{1n}(x_1) F_{2n}(x_2) F_{3n}(x_3).$$

Коэффициенты ряда C_n подбираются таким образом, чтобы удовлетворить всем условиям постановки краевой задачи (на границах, в бесконечности и т.п.). С этой целью составляется и решается система уравнений, причем используется свойство ортогональности собственных функций.

Для определения коэффициентов ряда широко применяются численные методы.

Для сложных граничных задач с неоднородны-

ми краевыми условиями методом разделения переменных определяется вид функции Грина соответствующей краевой задачи, а затем находится решение задачи с неоднородными граничными условиями или интеграл уравнения Пуассона.

Метод интегральных уравнений теории потенциала базируется на сведениях расчета магнитных и электрических полей в кусочно-однородной среде к расчету поля в однородной среде. Для этого вводятся дополнительные (вторичные) источники поля, распределенные по границе раздела сред. Вторичные источники (заряды, токи намагнитичности, поверхностные токи) должны совместно с первичными источниками обеспечить заданные краевые условия поставленной задачи. Таким образом, решение краевой задачи сводится к составлению уравнений (интегральных) для расчетных источников (сумма первичных и вторичных источников) и решению их, как правило, численными методами. Искомые значения определяются по найденному распределению зарядов путем интегрирования по всем источникам.

Интегральное уравнение для внутренней задачи Дирихле, т.е. если на границе области задано распределение потенциалов φ_S (рис. 4.18, а) для двойного слоя зарядов плотностью $\nu(S)$, помещенного на поверхность S , описывается уравнением Фредгольма второго рода:

$$\nu(M) + \frac{1}{2\pi} \int_S \nu(P) \frac{\cos\theta}{r^2} dS = 2\epsilon_r\epsilon_0\varphi_S.$$

Если на поверхности S расположить простой слой зарядов плотностью $\chi(P)$, то получим интегральное уравнение Фредгольма первого рода

$$\int_S \frac{\chi(P)}{r} dS = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0\varphi_S.$$

Для внутренней краевой задачи Неймана (на поверхности задано распределение $\partial\varphi_S/\partial n$) плотность простого слоя зарядов, помещенных на поверхность, должна удовлетворять уравнению

$$\chi(M) + \frac{1}{2\pi} \int_S \chi(P) \frac{\cos\eta}{r^2} dS = -2\epsilon_r\epsilon_0 \frac{\partial\varphi_S}{\partial n}.$$

Наличие на границе неоднородных краевых условий (на одной части поверхности задано φ_S , на другой части $\partial\varphi_S/\partial n$) приводит к системе интегральных уравнений. При составлении уравнений необходимо также учитывать внешние распределенные или сосредоточенные заряды. Например, если поле в среде с ϵ_e , в которой имеется область V_1 с ϵ_i (рис. 4.18, б), создается объемным зарядом ρ , помещенным в область V_e , то для расчета поля во внешней области плотность зарядов на границе должна удовлетворять уравнению

$$\chi(M) = \frac{\epsilon_i - \epsilon_e}{\epsilon_i + \epsilon_e} \frac{1}{2\pi} \left[\int_S \frac{\chi(P)}{r_{MP}^2} \cos\eta ds + s + \int_{V_e} \rho(N) \frac{\cos\beta}{r_{MN}^2} dV \right].$$

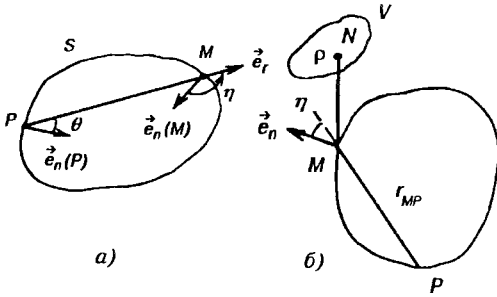


Рис. 4.18

При решении численными методами соответствующие интегралы заменяют конечными суммами, разбивая поверхность S на k элементов. Например, уравнение Фредгольма второго рода запишется в виде

$$v_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k \frac{\cos \theta_{ij} \Delta s_j}{2\pi r_{ij}^2} v_j = 2\epsilon_r \epsilon_0 \varphi_i, \quad i = \overline{1, k}.$$

Метод конечных разностей (метод сеток) решения уравнения Пуассона является одним из универсальных методов расчета электромагнитных полей. Метод основан на разностной аппроксимации решаемого уравнения и граничных условий, для чего в рассматриваемой области выбирается система узлов (помещается сетка) и составляется система уравнений для выбранных точек (узлов). Для упрощения составления уравнений обычно стороны ячеек сетки выбирают совпадающими с координатными поверхностями и граничных условий, в которой записано решаемое уравнение. При этом граничные поверхности (поверхности разделов сред) аппроксимируются совокупностью таких же частей поверхности. При расчете трехмерных полей в декартовой системе координат ячейками являются прямоугольные параллелепипеды. Для двумерных полей сетки образуют ячейки с прямолинейными или с криволинейными сторонами.

В простейшем случае расчета двумерного поля в декартовой системе координат выбирается прямоугольная сетка (рис. 4.19, а) и используется пятиточечный шаблон (рис. 4.19, б). Для сетки с выбранным шаблоном уравнение Пуассона $\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 = -\rho / \epsilon_0 \epsilon$ можно аппроксимировать системой уравнений:

$$-4\delta_0 \varphi_{i,j} + \delta_1 \varphi_{i-1,j} + \delta_2 \varphi_{i+1,j} + \delta_3 \varphi_{i,j-1} + \delta_4 \varphi_{i,j+1} = f_{i,j},$$

где $\delta_0 = (a_1 a_2 + a_3 a_4) / (2 a_1 a_2 a_3 a_4)$; $\delta_1 = 2 / (a_1 + a_2) a_1$; $\delta_2 = 2 / (a_1 + a_2) a_2$; $\delta_3 = 2 / (a_3 + a_4) a_3$; $\delta_4 = 2 / (a_3 + a_4) a_4$ — коэффициенты, зависящие от параметров шаблона; $f_{i,j}$ — известная функция в узлах сетки.

Приведенные уравнения справедливы во всех точках исследуемой области, кроме граничных. Для аппроксимации граничных условий криволинейную границу можно заменить ломаной линией, совпадающей с линиями ячеек сетки. Если на

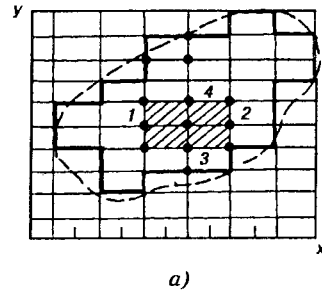


Рис. 4.19

границе заданы условия Дирихле $\varphi(S) = \varphi_S$, то следует использовать уравнения: $\varphi_{i,j} = \varphi_S(i, j \in S)$. Если на границе, совпадающей с координатной линией, заданы условия Неймана $\partial \varphi_s / \partial n = \psi_S$, то используются уравнения:

$$(\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}) \approx h \psi_{i,j}.$$

Полученная система алгебраических уравнений эффективно решается итерационными методами прогонки, релаксации и др.

Метод конечных элементов является одним из наиболее универсальных методов расчета полей. При этом вся область исследования разбивается на элементарные смежные подобласти (конечные элементы). В каждом из этих элементов искомая функция (потенциал) аппроксимируется полиномом невысокой степени координат. Коэффициенты полинома определяются значениями функции в узлах элемента, т. е. при известной функции в узлах элемента имеется возможность ее интерполяции на всем конечном элементе. Таким образом, искомое распределение потенциала строится по частям для каждого конечного элемента. Полученная функция должна удовлетворять уравнению Пуассона (Лапласа), дополненному граничными условиями и условиями непрерывности для каждого элемента и области в целом. Метод базируется на вариационной постановке краевой задачи, которая состоит в том, что решение дифференциальных уравнений для некоторого объема V с заданными граничными условиями сводится к отысканию такой функции, которая обеспечит экстремум (минимум) некоторого функционала, причем вид функционала определяется исходным уравнением и граничными условиями. Например, электростатическая внутренняя задача Дирихле для уравнения Лапласа $\partial^2 \varphi / \partial x^2 + \partial^2 \varphi / \partial y^2 + \partial^2 \varphi / \partial z^2 = 0$ соответствует минимизации функционала

$$W(\varphi) = \int_V \varepsilon_r \varepsilon_0 (\text{grad } \varphi)^2 dV,$$

который равен удвоенной энергии поля в объеме V . Очевидно, что решение определяется в соответствии с принципом минимума потенциальной энергии, т. е. $\min \{W(\varphi)\}$.

В данном случае (задача Дирихле) потенциал на поверхности описывается известной функцией (главное краевое условие) и не требует изменения функционала. Для задачи Неймана, когда потенциал на границе неизвестен (задано $\partial\varphi_S/\partial n$) необходимо изменить функционал

$$W(\varphi) = \int_V \varepsilon_r \varepsilon_0 (\text{grad } \varphi)^2 dV - \int_S \varepsilon_r \varepsilon_0 \varphi_S \frac{\partial \varphi_S}{\partial n} dS,$$

причем второй интеграл пропорционален энергии зарядов $\nu = \varepsilon_r \varepsilon_0 \partial\varphi_S/\partial n$.

Решение двумерной краевой задачи Дирихле для области S в декартовой системе координат предусматривает разбиение области на M простых (например, треугольных) конечных элементов и аппроксимации потенциала на конечном элементе финитной функцией в виде полинома, имеющего b членов

$$\varphi_e(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 xy + \alpha_5 y^2 + \dots + \alpha_{b-1} y^{b-1}.$$

Если на границе элемента выделить b узловых точек: $\varphi^1 \dots \varphi^b$, то коэффициент аппроксимирующего полинома выражается через узловые потенциалы и определенные функции координат:

$$\varphi_e(x, y) = \sum_{m=1}^b \Psi_m(x, y) \varphi^m.$$

Энергетический функционал элемента также записывается через потенциалы узлов:

$$W^e = \sum_{n=1}^b \sum_{m=1}^b k_{mn}^e \varphi^m \varphi^n,$$

где $k_{mn}^e = \int_{S_e} (\text{grad } \Psi_m) (\text{grad } \Psi_n) dS_e$; S_e — площадь конечного элемента.

Полная энергия в области S образуется как сумма энергий всех элементов. При объединении элементов должна обеспечиваться непрерывность потенциала, т. е. должны иметь одинаковые значения потенциалы смежных элементов с одинаковыми номерами. Это записывается с помощью матрицы связи C :

$$\varphi_d^e = C \varphi_c,$$

где φ_d^e — столбец потенциалов конечного элемента; φ_c — столбец потенциалов связанной системы.

Энергия связанной системы в матричной форме получится, если соотношение для W^e представить в матричной форме:

$$W^e = \varphi_d^T K_e \varphi_d,$$

где $\varphi = [\varphi^1, \varphi^2, \dots, \varphi^b]^T$; K_e — матрица $b \times b$

с элементами k_{mn} , при этом энергия связанной системы имеет вид

$$W = \varphi_c^T (C^T K_e C) \varphi_c.$$

Необходимым условием минимума функционала W является равенство частных производных $dW/d\varphi^b = 0$, которое в силу квадратичной зависимости W от потенциалов приводит к системе линейных алгебраических уравнений

$$K \varphi_c = 0.$$

В полученные уравнения входят потенциалы всех узлов рассматриваемой области, которые целесообразно разделить на внутренние φ_i и граничные φ_s и представить уравнения в виде

$$K_{11} \varphi_i = -K_{12} \varphi_s,$$

где K_{11} и K_{12} — подматрицы матрицы K , строки которых соответствуют внутренним узлам.

Матрица K является сильно разреженной, и для ее обращения существуют эффективные численные алгоритмы. Получение матрицы K путем перемножения подматриц нерационально, и поэтому ее формируют путем сложения подматриц от вклада каждого элемента.

С помощью рассмотренных методов можно определить параметры элементов реальных электротехнических устройств. В качестве примера в табл. 4.4 приведены низкочастотные параметры воздушных линий.

4.5. ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Для изотропных линейных проводящих сред в диапазоне скоростей изменения составляющих векторов электромагнитного поля, при которых можно пренебречь током смещения $\partial D/\partial t \ll J$ уравнения Максвелла принимают вид

$$\text{rot } E = -\mu_r \mu_0 \partial H / \partial t, \quad \text{rot } E = J;$$

$$\text{div } E = 0, \quad \text{div } H = 0.$$

Исключение одной из переменных приводит к уравнениям теплопроводности:

$$\nabla^2 E - \mu_r \mu_0 \sigma \partial E / \partial t = 0;$$

$$\nabla^2 H - \mu_r \mu_0 \sigma \partial H / \partial t = 0,$$

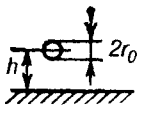
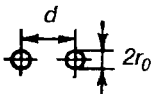
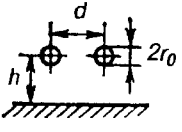
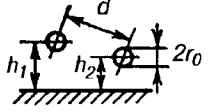
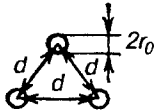
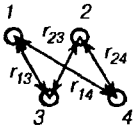
которые описывают распространение электромагнитного поля в проводящей среде. Полученные уравнения решаются сравнительно просто только для плоских волн, когда векторы E и H лежат в одной плоскости и зависят только от координаты, нормальной к указанной плоскости [например, $E_x(z)$ и $E_y(z)$]. В этом случае уравнения теплопроводности становятся скалярными.

Плоская гармоническая волна $E_x = E_{xm} \sin(\omega t + \psi_x)$ для комплексных изображений описывается уравнением

$$d^2 \dot{E}_x / dz^2 - j \omega \mu_r \mu_0 \sigma \dot{E}_x = 0,$$

решение которого имеет вид

Т а б л и ц а 4.4. Емкость, индуктивность и взаимная индуктивность воздушных линий

Схема	C_0 , Ф/км	L_0 , Гн/км
	$\frac{10^{-6}}{18 \ln (2h / r_0)}$	$0,2 \left(\ln \frac{2h}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	$\frac{10^{-6}}{36 \ln (d / r_0)}$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	$\frac{10^{-6}}{9 \ln \frac{(2h / r_0)^2}{1 + (2h / d)^2}}$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3} - 2 \ln (1 + d^2 / 4h^2) 10^{-4}$
	$36 \ln \left[\frac{d}{r_0} \sqrt{\frac{4 h_1 h_2}{4 h_1 h_2 + d^2}} \right]$	$0,4 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$ при $d \ll h_1$ и h_2
	Емкость на фазу $\frac{10^{-6}}{18 \ln (d / r_0)}$	Индуктивность на фазу $0,2 \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right) 10^{-3}$
	1,2 — первая линия, 3,4 — вторая линия Взаимная индуктивность $0,2 \cdot 10^{-3} \ln \frac{r_{23} r_{14}}{r_{13} r_{24}}$, Гн / км .	

При произвольном расположении проводов трехфазной линии емкость на фазу с учетом земли

$$\frac{10^{-6}}{18 \ln (2 h d / r_0 D)},$$

где h , d и D — среднегеометрические значения высоты подвеса, расстояния между проводами и расстояния между одним проводом и зеркальным изображением другого:

$$h = \sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}; \quad d = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{31}}; \quad D = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}.$$

Индуктивность на фазу при $d \ll h$

$$2 \cdot 10^{-4} \left(\ln \frac{d}{r_0} + 0,25 \right).$$

$$\dot{E}_x = C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z},$$

где C_1 и C_2 — комплексные константы, зависящие от граничных условий; $\gamma = \sqrt{j\omega\mu_r\mu_0\sigma}$ — постоянная распространения.

В соответствии с уравнениями Максвелла для напряженности магнитного поля справедливо выражение

$$\dot{H}_y = (C_1 e^{-\gamma z} - C_2 e^{\gamma z}) / \zeta,$$

где $\zeta = \sqrt{j\omega\mu_r\mu_0/\sigma}$ — комплексное волновое сопротивление среды.

Соотношения для E_x и H_y можно рассматривать как прямую и обратную волны

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{об}}; \quad \dot{H}_y = \dot{H}_{\text{пр}} - \dot{H}_{\text{об}} = (\dot{E}_{\text{пр}} - \dot{E}_{\text{об}}) / \zeta.$$

Если рассмотреть распространение волны в проводящей полуплоскости, то $C_1 = \dot{E}_0$ (на поверхности) и $C_2 = 0$. Вследствие комплексного значения постоянной распространения $\gamma = \alpha + j\beta$, причем $\alpha = \beta = \sqrt{\omega\mu_r\mu_0\sigma/2}$, составляющая волны будет затухать при изменении вдоль координаты:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{пр}}(z, t) &= E_0 \sqrt{2} e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z + \psi_x); \\ H_{\text{пр}}(z, t) &= \frac{E_0}{|\zeta|} \sqrt{2} e^{-\alpha z} \sin(\omega t - \beta z + \psi_x - \pi/4). \end{aligned} \right\}$$

Для описания распространения плоской волны в проводнике по оси z используются длина волны $\lambda = 2\pi/\beta$ и фазовая скорость $v_{\text{ф}} = \omega/\beta$. Затухание

волны принято характеризовать расстоянием, на котором амплитуда волны уменьшается в $e \approx 2,71$ раза (глубина проникновения):

$$z_0 = 1/\alpha = \sqrt{2/\omega\mu_r\mu_0\sigma}.$$

При высоких частотах переменное электромагнитное поле занимает достаточно узкий слой у поверхности проводника, не проникая вглубь. Явление неравномерного распределения поля по сечению проводника называется поверхностным эффектом.

В табл. 4.5 приведены приближенные значения глубины проникновения z_0 для некоторых сред.

Неравномерность распределения электрического и магнитного полей в зависимости от частоты обуславливает зависимость от частоты интегральных характеристик электрических и магнитных цепей (сопротивления, индуктивности), т. е. отличия их значений от рассчитанных в статических и стационарных режимах.

Расчет комплексных сопротивлений при переменных токах (резистивного и внутреннего индуктивного) с учетом поверхностного эффекта основан на определении потока комплексного вектора Пойнтинга, входящего внутрь проводника. Таким образом вычисляется потребляемая в проводнике комплексная мощность, разделив которую на квадрат модуля тока, получим комплексное сопротивление проводника. На высокой частоте при сильно выраженном поверхностном эффекте можно приближенно считать, что ток (или магнитный поток) равномерно распределен только в узком приповерхностном слое, толщина которого равна глубине проникновения.

Т а б л и ц а 4.5

Частота f , Гц	Среда			
	Медь ($\sigma = 6 \cdot 10^7$ См/м, $\mu = 1$)	Ферромагнетик ($\sigma = 10^7$ См/м, $\mu = 1000$)	Морская вода ($\sigma = 2$ См/м, $\mu = 1$)	Сухая вода ($\sigma = 10^{-2}$ См/м, $\mu = 1$)
50	0,9 см	0,7 мм	50 см	700 м
5000	0,9 мм	0,07 мм	5 м	70 м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 4.1. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Т.2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля/ Под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976.
- 4.2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Т.2. Л.: Энергоиздат, 1981.
- 4.3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Высшая школа, 1986.
- 4.4. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля: Справочное пособие. М.: Высшая школа, 1989.
- 4.5. Светов Б.С., Губатенко В.П. Аналитические решения электродинамических задач. М.: Наука, 1988.
- 4.6. Иоссель Ю.Я. Расчет потенциальных полей в энергетике: Справочная книга. Л.: Энергия, 1978.
- 4.7. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. М.: Высшая школа, 1986.
- 4.8. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 4.9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- 4.10. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, 1981.

Р а з д е л 5

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

СО Д Е Р Ж А Н И Е

5.1. Основы метрологии	91	Измерение мощности в цепях постоянного тока (101). Измерение активной мощности в цепях переменного тока (101). Измерение энергии (102).	
Основы понятия метрологии (91). Погрешности измерений (91). Основные характеристики средств измерений электрических и магнитных величин (92). Обработка результатов прямых измерений, содержащих случайные погрешности (93). Обработка результатов прямых измерений, содержащих систематические погрешности. Представление результата измерения (94).		5.3. Электроизмерительные приборы	102
5.2. Измерение электрических величин	96	Общие свойства (102). Аналоговые измерительные приборы (103). Цифровые измерительные приборы (105). Счетчики электрические (113).	
Измерение напряжений и токов (96). Измерение параметров электрических цепей (99). Измерение мощности (101).		5.4. Методы измерения магнитных величин	116
		5.5. Средства измерения магнитных величин	120
		Список литературы	125

5.1. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений — положение в области измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью.

Измерение — процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (средств измерений).

Физическая величина — характеристика одного из свойств физического объекта, физической системы, явления или процесса, общая в качественном отношении для многих физических объектов (процессов), но индивидуальная в количественном отношении для каждого из них.

Средство измерений — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое стремятся найти в соответствии с поставленной задачей и которое абсолютно верно отражало бы эту величину.

Значение физической величины, найденное путем ее измерения, называют результатом измерения. Важной характеристикой любого результата измерения является его точность, которая отражает близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

Погрешность измерения — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности измерений систематизируются по трем признакам: месту возникновения, характеру проявления и способу выражения (рис. 5.1).

По способу выражения погрешности измерения делятся на абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность измерений — разность между результатом измерения X и истинным значением измеряемой величины $X_{\text{ист}}$:

$$\Delta X = X - X_{\text{ист}}.$$

Относительная погрешность измерения — отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины

$$\delta = \Delta X / X_{\text{ист}}.$$

Часто истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и вместо него используют результат измерения, а относительную погрешность выражают в процентах:

$$\delta \approx \Delta X / X \cdot 100\%.$$

Погрешности измерений определяют зону неопределенности результата измерений. Если погрешность соответствует своему значению с некоторой вероятностью, то ее называют доверительной погрешностью, а границы, в которых находится погрешность, — доверительными границами погрешности результата измерения. Если границы погрешности назначены так, что погрешность измерения не выходит за их значения, то указанные границы называют предельной погрешностью измерения.

Погрешности измерений не требуется знать точно. В окончательной записи погрешность измерения принято выражать числом с одной или двумя значащими цифрами, причем погрешность округления при вычислении этого значения должна быть не более 5% (ГОСТ 8.401-80).

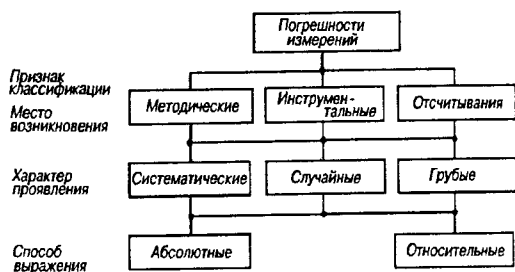


Рис. 5.1. Классификация погрешностей измерений

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Точность является важнейшей характеристикой средства измерений, отражающей близость к нулю его погрешностей (рис. 5.2).

Обобщенной характеристикой средства измерений, отражающей уровень его точности и представленной набором нормированных метрологических характеристик, является класс точности, который характеризует средство измерений, но не является непосредственной характеристикой точности измерения, выполняемого с помощью данного средства измерения.

Классы точности устанавливаются на средства измерений, предназначенные для работы в условиях, при которых динамические погрешности измерения пренебрежимо малы по сравнению с нормированной для этих средств измерений погрешностью. В стандартах на средства измерений для каждого класса точности устанавливают конкретные требования к метрологическим характеристикам, в совокупности отражающие уровень точности средств измерений этого класса. Например, для вольтметров нормируют следующие метрологические характеристики: предел допускаемой основной погрешности и соответствующие нормальные условия; пределы допускаемых дополнительных погрешностей и соответствующие рабочие

области влияющих величин; пределы допускаемой вариации показаний; невозвращение указателя к нулевой отметке.

Классы точности цифровых измерительных приборов со встроенными вычислительными устройствами для дополнительной обработки измерительной информации устанавливаются без учета режима обработки.

Условные обозначения классов точности зависят от средств измерений.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых выражаются в форме абсолютных или относительных погрешностей, причем последние представлены в виде графика, таблицы или формулы, класс точности обозначается прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. Классы точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, обозначаются буквами, расположенными ближе к началу алфавита, или цифрами, отражающими меньшие числа.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах значения измеряемой величины $\delta_{\text{и}}$, обозначаются помещенными в кружок числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной погрешности. Например, $(0,5)$ для $\delta_{\text{и}} = \pm 0,5\%$. К таким средствам измерения относятся однозначные меры*, интегрирующие приборы, например счетчики электрической энергии и пр.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения $\gamma_{\text{и}}$, определенного в единицах измеряемой величины, обозначаются числами, совпадающими со значением предела допускаемой основной приведенной погрешности. Например, 1,5 для $\gamma_{\text{и}} = \pm 1,5\%$. К таким средствам измерения относятся главным образом показывающие и самопишущие приборы.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются двучленной формулой $\delta_{\text{и}} =$

$$= \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_{\text{к}}}{X} \right| - 1 \right) \right],$$
 обозначаются двумя числами, выражающими c и d в процентах и разделенными косой чертой (c/d). Например, для

$\delta_{\text{и}} = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\left| \frac{X_{\text{к}}}{X} \right| - 1 \right) \right]$ класс точности обозначается 0,02/0,01. К таким приборам относятся цифровые вольтметры, цифровые мосты и т. п.

Классы точности средств измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в процентах нормирующего значения, определенного длиной шкалы, обозначаются числом в процентах, помещенным между двумя линиями, расположенными под углом. Например, $\sqrt{0,5}$. К таким средствам измерения относятся показывающие приборы с гиперболической или логарифмической шкалой.

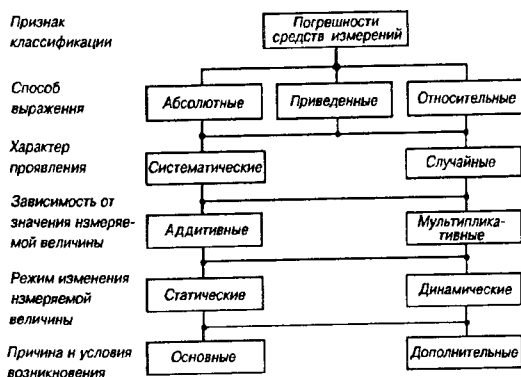


Рис. 5.2. Классификация погрешностей средств измерений

* Меры с одним значением воспроизводимой величины, например нормальный элемент, резистор и т. п.

Т а б л и ц а 5.1. Значения климатических влияющих величин

Условия применения	Влияющие величины		Значения влияющих величин для групп средств измерений						
			1	2	3	4	5	6	7
Рабочие	Температура окружающего воздуха, °С	Нижнее значение	10	10	5	– 10	– 30	– 50	– 30
		Верхнее значение	25	35	40	40	50	60	70
	Относительная влажность воздуха, %	Среднемесячное значение	65 при 20 °С		80 при 20 °С			90 при 27 °С	80 при 20 °С
		Верхнее значение	80 при 20 °С	80 при 25 °С	90 при 25°С	90 при 30 °С	90 при 30 °С	95 при 35 °С	90 при 30 °С
	Атмосферное давление, К (мм рт.ст.)		86–106 (650–800)				60–106 (460–800)		
Предельные	Температура окружающего воздуха, °С	Нижнее значение	– 50						
		Верхнее значение	+ 50						
	Относительная влажность воздуха, %		95 при 25 °С		95 при 35 °С		—		
	Атмосферное давление, К (мм рт.ст.)		86–106 (650–800)				60–106 (460–800)		

Нормальное значение и область нормальных значений влияющей величины, если она обозначена на средстве измерения, подчеркивается. Расширенная область значений влияющей величины указывается без подчеркивания.

Для средств измерений установлены следующие условия применения: нормальные, рабочие и предельные. Последние — для целей транспортирования и хранения.

При нормальных условиях применения значения (области значений) влияющих величин, характеризующих климатические воздействия и электропитание средств измерений, должны находиться в пределах:

Окружающая температура, °С...20±0,5; 20±1; 20±2; 20±5

Относительная влажность воздуха, % ... 65±15

Атмосферное давление, кПа (мм рт.ст.) 100±4 (750±30)

Напряжение питающей сети, В, для сети с частотой:

50 Гц. 220±4,4

400 Гц. 220±4,4 или 115±2,5

Под рабочими условиями применения понимаются допустимые значения климатических и механических воздействий, а также параметров источников питания, при которых приборы сохраняют свою работоспособность и нормированную для них погрешность в течение длительного времени.

Предельными условиями применения называют граничные значения климатических и механических воздействий, при которых приборы могут храниться или транспортироваться, сохраняя свою работоспособность и нормированную для них точность.

В зависимости от вида внешних воздействий и их значений все средства измерений делятся на семь групп. В табл. 5.1 представлены значения

климатических влияющих величин для рабочих и предельных условий применения указанных групп, соответствующие ГОСТ 22261-82.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Обработка результатов измерений имеет цель — дать оценку истинному значению измеряемой величины и определить степень достоверности этой оценки. Здесь рассматривается случай, при котором систематической погрешностью результата измерения можно пренебречь (оценки систематических погрешностей результата измерения рассматриваются ниже), а о распределении случайных погрешностей ничего не известно.

Если выполнено только одно измерение и измерительный прибор дал показание A , то в качестве оценки $A_{и}$ истинного значения измеряемой величины $A_{и}$ следует принять это показание. Однако определить степень достоверности полученного результата измерения $A_{и}$ невозможно, так как распределение случайных погрешностей неизвестно.

Если выполнено N независимых измерений одной и той же величины A ($N \geq 2$) и получен ряд результатов наблюдений $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$, то в качестве оценки истинного значения измеряемой величины берется среднее арифметическое значение результатов наблюдений

$$A_{и} = \bar{a}_{и} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{N},$$

где a_i — результат отдельного наблюдения.

Дисперсия оценки истинного значения измеря-

емой величины (результата измерения) характеризуется выражением

$$D[\bar{A}_n] = \bar{d}_n = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_n)^2}{N(N-1)},$$

а ее среднеквадратическое отклонение

$$\bar{\sigma}_n = \sqrt{\bar{d}_n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_n)^2}{N(N-1)}}.$$

Оценка дисперсии и среднеквадратического отклонения одного наблюдения в полученной серии N результатов наблюдений характеризуется соответственно величинами

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_n)^2}{N-1}; \quad \bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_n)^2}{N-1}.$$

Величина $\bar{\sigma}_n$ позволяет дать количественную оценку степени достоверности результата измерения, т. е. найти значение доверительного интервала при заданной доверительной вероятности.

Оценки степени достоверности результата измерения производятся путем задания доверительного интервала и доверительной вероятности.

Доверительным интервалом I_d называют интервал от Δ_1 до Δ_2 , который с заданной вероятностью P_d , называемой доверительной, накрывает истинное значение измеряемой величины a_n :

$$I_d = (\bar{a}_n - \Delta_1; \bar{a}_n + \Delta_2);$$

$$P_d = P(-\Delta_1 \leq a_n - \bar{a}_n \leq \Delta_2),$$

где $\bar{a}_n$ — оценка значения величины a_n , полученная в результате измерения.

При отсутствии систематических погрешностей и известной плотности распределения вероятностей случайных погрешностей $f(x)$ вычисление доверительной вероятности производится по формуле

$$P_d = \int_{-\Delta_1}^{\Delta_2} f(x) dx.$$

При нормальном распределении и симметричности интервала $|\Delta_1| = \Delta_2 = \Delta$

$$P_d = \int_{-\Delta}^{\Delta} f(x) dx = \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right),$$

где Φ — функция Лапласа.

Если закон распределения случайных погрешностей неизвестен, то можно дать лишь грубую оценку доверительной вероятности на основе неравенства Чебышева

$$P_d = P(|X| \leq \Delta) \geq 1 - \frac{\sigma^2}{\Delta^2}.$$

Неравенство Чебышева устанавливает нижнюю

границу доверительной вероятности. На практике часто действительное значение доверительной вероятности оказывается значительно большим. Поэтому неравенством Чебышева пользуются редко, в основном для грубых оценок.

Обратная задача, т. е. задача определения доверительного интервала по заданной доверительной вероятности, решается с помощью функции Ψ , обратной Φ . Так, половина длины симметричного доверительного интервала Δ равна:

$$\Delta \approx \sigma_n \Psi(P_d).$$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

Обнаружение систематических погрешностей — сложная задача, особенно постоянных по своему значению, так как последние в процессе измерения ничем себя не проявляют. Поэтому и устранение систематических погрешностей производится не математической обработкой экспериментальных данных, а применением более точных методов измерений. Для этих целей в электроизмерительной технике часто используются методы замещения, коммутационного инвертирования и др.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерения оцениваются по ее составляющим. Если выявлен источник систематической погрешности и получена оценка погрешности, то она устраняется из результата измерения путем введения поправки. Поправка равна погрешности с обратным знаком. Однако чаще анализ позволяет установить лишь границы составляющих систематической погрешности, и возникает задача оценки систематической погрешности результата измерения путем суммирования ее составляющих.

Имеющиеся в настоящее время нормируемые метрологические характеристики средств измерений позволяют определить только предельные значения составляющих $\Delta_{i\ n}$ погрешности измерения Δ , т. е. такие, для которых с вероятностью $P = 1$ можно считать, что действительные значения этих составляющих Δ_i не превышают $\Delta_{i\ n}$.

Методы расчета погрешностей зависят от характера их проявления. Случайные погрешности рассчитываются методами теории вероятностей. Систематические или суммарные погрешности могут рассчитываться как методом наихудшего случая, так и методами теории вероятностей.

При расчете случайной составляющей погрешности чаще всего предполагается нормальный закон распределения для ее составляющих.

При расчете систематической составляющей погрешности методами теории вероятностей расчет обычно ведется по пределам допускаемых значений исходных величин $\Delta_{i\ n}$.

Рассмотрим расчет систематической составляющей погрешности при использовании метода наихудшего случая. При этом предполагается, что все

исходные величины $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ принимают максимальные по модулю значения.

Если значения всех $\Delta_{i\text{ п}}$ — двузначны и симметричны, т. е. $\Delta_{i\text{ п}} = \pm A$, то модуль предельного значения погрешности измерения находят путем арифметического суммирования модулей составляющих:

$$|\Delta_{\text{п}}| = \sum_{i=1}^n |\Delta_{i\text{ п}}|.$$

а результат измерения представляется в виде

$$X \pm \Delta_{\text{п}}; P = 1.$$

Если же некоторые $\Delta_{i\text{ п}}$ несимметричны, т. е. модули нижнего и верхнего пределов неравны $|\Delta_{i\text{ п.н}}| \neq |\Delta_{i\text{ п.в}}|$, то верхний и нижний пределы погрешности измерения вычисляются отдельно:

$$\Delta_{\text{п.н}} = \sum_{i=1}^m \Delta_{i\text{ п.н}} - \sum_{i=m+1}^n |\Delta_{i\text{ п}}|;$$

$$\Delta_{\text{п.в}} = \sum_{i=1}^m \Delta_{i\text{ п.в}} - \sum_{i=m+1}^n |\Delta_{i\text{ п}}|,$$

где $i = 1, \dots, m$ и $i = (m+1), \dots, n$ — номера составляющих с несимметричными и с симметричными пределами.

Результат измерения представляется в виде

$$X, \Delta_{\text{п}} \text{ от } \Delta_{\text{п.н}} \text{ до } \Delta_{\text{п.в}}; P = 1.$$

Если есть основания считать, что составляющие с несимметричными пределами имеют симметричные относительно математического ожидания законы распределения, то можно внести поправку η в результат измерения X .

Для этого вычисляют

$$\eta = 0,5 \sum_{i=1}^m (\Delta_{i\text{ п.н}} + \Delta_{i\text{ п.в}})$$

и модуль симметричного предельного значения погрешности измерения

$$|\Delta_{\text{п}}| = 0,5 \sum_{i=1}^m |\Delta_{i\text{ п.в}} - \Delta_{i\text{ п.н}}| + \sum_{i=m+1}^n |\Delta_{i\text{ п}}|,$$

а результат измерения представляют в виде

$$X - \eta \pm \Delta_{\text{п}}; P = 1.$$

При суммировании составляющих погрешности измерения, заданных случайными величинами, нужно знать или принять гипотезу о виде законов распределения составляющих. Для этих целей в измерительной технике используют семь стандартных аппроксимаций, показанных в табл. 5.2. Здесь нормальный закон и закон Релея даются в усеченном виде. При такой аппроксимации случайная величина не выходит за пределы $\pm a$. В правом столбце дано отношение предела погрешности a к среднему квадратическому отклонению, обозначенное через K .

Итак, среднееквадратическое отклонение каждой составляющей погрешности связано с ее предельным значением соотношением

$$\sigma_i \approx \frac{\Delta_{i\text{ п}}}{K}.$$

Если все составляющие имеют симметричные пределы, то среднееквадратическое отклонение результирующей погрешности вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2},$$

а модуль предельного значения погрешности измерения

$$|\Delta_{\text{п}}| = K^* \sigma,$$

где K^* — коэффициент, зависящий от заданной вероятности P того, что

$$X - \Delta_{\text{п}} \leq X_{\text{ист}} \leq X + \Delta_{\text{п}},$$

где $X_{\text{ист}}$ — истинное значение измеряемой величины.

При суммировании нормально распределенных составляющих результирующий закон тоже является нормальным. Зависимость $K^*(P)$ для нормального закона табулирована. Например, значению $P = 0,95$ соответствует $K^* \approx 2$, т. е.

$$|\Delta_{\text{п}}| = 2 \sigma.$$

После вычисления значения $|\Delta_{\text{п}}|$ результат измерения записывается в виде

$$X \pm \Delta_{\text{п}}; P.$$

При записи чисел X и $\Delta_{\text{п}}$ используются следующие правила округления.

1. Число, выражающее результат измерения X , должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и предельное значение погрешности измерения $\Delta_{\text{п}}$. При этом лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

Например, число 1123 (любых единиц измерения) при погрешности измерения ± 50 (тех же единиц) округляют до 1120, а число 1,123 при погрешности $\pm 0,05$ — до 1,12.

Если десятичная дробь оканчивается нулями, то соответственно отбрасываются не все нули. Например, для числа 1,1 при той же погрешности 0,05 следует записать 1,10.

2. Если первая из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр в числе, выражающем X , меньше 5, то остающиеся цифры не изменяют; если она больше или равна 5, то последнюю оставшуюся цифру увеличивают на 1.

3. Число, выражающее предельное значение погрешности измерения, должно содержать не более двух цифр.

Т а б л и ц а 5.2. Стандартные аппроксимации функций распределения

Наименование функции	Сокращенное обозначение	График	$K = a/\sigma$
Нормальная (усеченная)	Норм.		3
Треугольная (Симпсона)	Δ		2, 4
Трапецевидная	Трап.		2, 3
Равномерная	Равн.		1, 7
Антимодальная I	Ам I		1, 5
Антимодальная II	Ам II		$a = 1,8$
Релея (усеченная)	—		3, 3

5.2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Измерение напряжений и токов производится посредством вольтметров и амперметров.

При измерении напряжения вольтметр подключается к зажимам электрической цепи, напряжение между которыми измеряется. Амперметр включается последовательно в электрическую цепь. Приборы могут быть постоянно включены в цепь или включаться только на время измерения и затем выключаться. В последнем случае конечное значение его входного сопротивления является причиной возникновения погрешности взаимодействия. Покажем это на примере измерения напряжения ХХ на зажимах активного двухполюсника (рис. 5.3, а). До замыкания ключа К напряжение на зажимах активного двухполюсника равно E . После замыкания ключа (подключения вольтметра) в

цепи возникает ток I и напряжение на зажимах двухполюсника снижается вследствие падения напряжения на его внутреннем сопротивлении:

$$\Delta U = IR_{\text{вых}} = E \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{вх}}},$$

где $R_{\text{вых}}$ — выходное сопротивление двухполюсника; $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление вольтметра.

Результат измерения $U = E - \Delta U$, откуда относительная погрешность взаимодействия

$$\delta_{\text{вз}} = \frac{U - E}{E} = - \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_{\text{вх}}} \approx - \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Снизить указанную погрешность можно только выбором вольтметра с достаточно большим по сравнению с $R_{\text{вых}}$ входным сопротивлением.

У средств измерений с входными усилителями при измерении напряжений низкого уровня часто необходимо учитывать входной ток (рис. 5.3, б). В таком случае

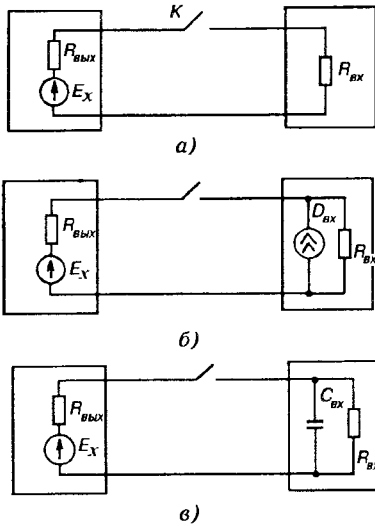


Рис. 5.3. Измерение напряжения активного двухполюсника

$$\delta_{вз} = - \left(\frac{R_{вых}}{R_{вх}} + \frac{I_{вх} R_{вых}}{E} \right).$$

Для средств измерений, измеряющих переменное напряжение, часто приходится учитывать помимо $R_{вх}$ еще и входную емкость $C_{вх}$ (рис. 5.3, в). В данном случае

$$\delta_{вз} = - \left[\frac{R_{вых}}{R_{вх}} - 0,5 (\omega R_{вых} C_{вх})^2 \right].$$

Применительно к измерению тока амперметром требование снижения погрешности взаимодействия удовлетворяется выбором амперметра с пренебрежимо малым собственным сопротивлением по сравнению с сопротивлением цепи, в которой измеряется ток.

Измерение сигналов низких уровней часто требует принятия мер борьбы с помехами. Различаются три основных источника внешних помех: переменные электрические поля, переменные магнитные поля, неэквипотенциальность контура заземления.

На рис. 5.4, а показан механизм возникновения помехи от внешнего источника переменного напряжения E . Источник сигнала представлен активным двухполюсником с параметрами E_x и $Z_{вых}$, приемник сигнала — пассивным двухполюсником, входное сопротивление которого $Z_{вх}$. Под воздействием E и при наличии распределенной емкости связи C в цепи возникает ток помехи I_n , который создает в измерительной цепи напряжение помехи

$$U = I \frac{Z_{вых} Z_{вх}}{Z_{вых} + Z_{вх}} \approx I Z_{вх}.$$

Борьба с этой помехой производится путем электрического экранирования входного контура (рис. 5.4, б). Верхний проводник контура измерительной цепи, часто вместе с источником и прием-

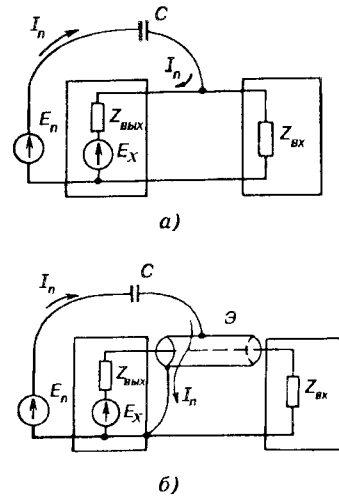


Рис. 5.4. Механизм возникновения помехи (а), созданной электрическим полем источника E ; защита (б) электрическим экраном

ником сигнала, закрывается электрическим экраном $\mathcal{E}$, который электрически объединяется с общей точкой источника сигнала. Ток помехи, попадая на экран, замыкается по нему на источник помехи, минуя входной контур измерительной цепи. При реализации данного метода важно выбрать точку заземления экрана так, чтобы ток помехи с экрана замыкался на источник E по цепи с минимальным сопротивлением.

На рис. 5.5, а показан механизм возникновения помехи от внешнего переменного магнитного потока Φ_n , сцепленного с входным контуром измерительной цепи, площадь которого обозначена S :

$$u_n = -w \frac{d\Phi_n}{dt},$$

где w — число витков входного контура.

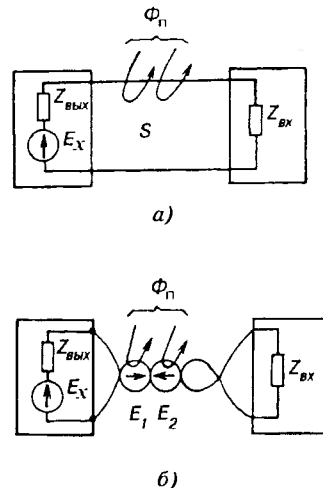


Рис. 5.5. Механизм возникновения помехи (а), созданной внешним магнитным полем Φ ; защита (б) методом скрутки проводников

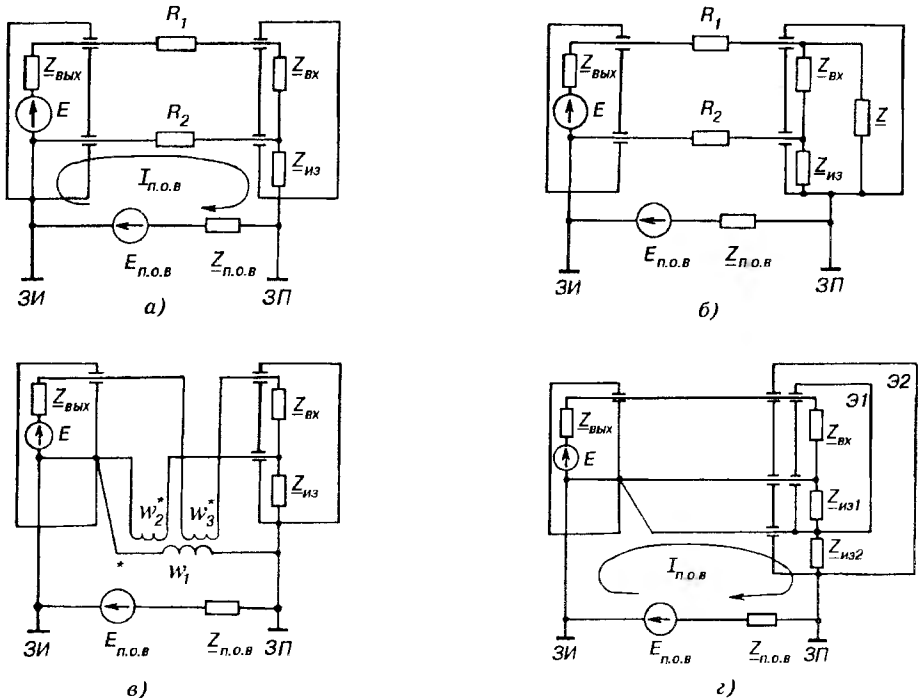


Рис. 5.6. Помеха общего вида:
 а — механизм возникновения, методы борьбы с помехой; б — симметрирование;
 в — компенсация; г — гальваническое разделение

В правильно организованном контуре $w = 1$. Примем, что индукция магнитного поля помехи B равномерно распределена по площади S контура, тогда

$$u_n = -S \frac{dB}{dt}.$$

Отсюда вытекают методы борьбы с помехой:

при монтаже измерительной цепи следует минимизировать площадь ее контура. Если источник сигнала и приемник разнесены на большое расстояние, то соединительные проводники следует свить (рис. 5.5, б), в таком случае ЭДС помехи, наводимые в двух соседних витках, будут компенсировать друг друга;

если известен источник помехи, например силовой трансформатор блока питания, его следует закрыть магнитным экраном для снижения интенсивности и скорости изменения магнитной индукции помехи;

если размеры измерительной цепи позволяют закрыть ее магнитным экраном, это следует сделать для снижения интенсивности и скорости изменения магнитной индукции помехи в контуре.

Неэквипотенциальность контура заземления обусловлена действием помех общего вида, борьбу с которыми ведут методами симметрирования, компенсации или гальванического разделения контура.

На рис. 5.6, а показан механизм действия помехи общего вида $E_{П.О.В}$, которая действует между «землей» источника ЗИ и «землей» приемника ЗП сигнала. Входная цепь приемника изоли-

рована от ЗП сопротивлением $Z_{ИЗ}$. Под воздействием $E_{П.О.В}$ возникает ток $I_{П.О.В}$, который на сопротивлении проводника связи R_2 создает напряжение помех нормального вида.

Метод симметрирования предполагает включение на стороне приемника дополнительной нагрузки с сопротивлением Z , как показано на рис. 5.6, б. Значение Z выбирается так, чтобы выполнялось условие

$$\frac{Z_{ВЫХ} + R_1}{Z} = \frac{R_2}{Z_{ИЗ}}.$$

Выдержать достаточно точно данное условие не просто, поэтому метод симметрирования применяют в тех случаях, когда не требуется высокой степени подавления помехи (более чем на порядок). Достоинство метода — простота реализации.

Метод компенсации предполагает использование трансформатора с тремя обмотками, имеющими одинаковое количество витков w_1 , w_2 и w_3 , включенными, как показано на рис. 5.6, в. В проводники связи источника сигнала с приемником вводятся ЭДС (обмоток w_2 и w_3), равные и противоположно направленные $E_{П.О.В}$. Метод компенсации позволяет подавить действие $E_{П.О.В}$ в несколько сотен раз.

Метод гальванического разделения предполагает такую организацию измерительной цепи, в которой отсутствует гальваническая связь между

измерительной цепью и выходными устройствами приемника сигнала. С этой целью входная цепь приемника закрывается электрическим экраном Э1, который гальванически объединяется с общей точкой источника сигнала (рис. 5.6, з). Сопротивление изоляции между входной цепью приемника и Э1 обозначено $Z_{из1}$. Экран Э1 закрыт вторым экраном Э2, в качестве которого обычно используется корпус прибора. Взаимодействие между функциональными узлами прибора, расположенными внутри Э1 и между Э1 и Э2 осуществляется элементами гальванического разделения. Сопротивление изоляции между экранами Э1 и Э2 обозначено $Z_{из2}$. Под воздействием $E_{п.о.в}$ в цепи возникает ток помехи общего вида $I_{п.о.в}$. Если пренебречь падением напряжения от этого тока на проводнике связи, то напряжение на $Z_{из1}$ от источника $E_{п.о.в}$ будет отсутствовать. Следовательно, отсутствуют токи от источника $E_{п.о.в}$ в проводниках между выходом источника и входом приемника измеряемого сигнала. Метод гальванического разделения сложен в реализации, но обладает весьма высокой эффективностью подавления $E_{п.о.в}$ и поэтому получил большое распространение в конструкциях цифровых вольтметров и мультиметров.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Для измерения параметров электрических цепей — сопротивления, емкости, индуктивности и взаимной активности — применяются приборы непосредственной оценки, сравнения и комбинированные приборы.

Приборы непосредственной оценки применяются при сравнительно грубых измерениях и строятся на основе логометров. Погрешность измерения такими приборами обычно не превышает 1%.

Комбинированный прибор представляет собой вольтметр постоянного тока, содержащий преобразователи параметров электрической цепи в постоянное напряжение, которое измеряется вольтметром. Погрешность измерения в данном случае зависит от типа применяемого вольтметра и качества преобразователей.

Наиболее распространенными приборами сравнения, предназначенными для измерения параметров электрических цепей, являются измерительные мосты. В зависимости от рода тока в диагонали питания моста различают мосты постоянного и переменного тока.

Разновидности мостов постоянного тока ограничены двумя вариантами — четырехплечим (одинарным) и двойным (рис. 5.7 и 5.8 соответственно).

Если измеряемое сопротивление включено в первое плечо одинарного моста и мост уравновешен, то

$$R_1 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}.$$

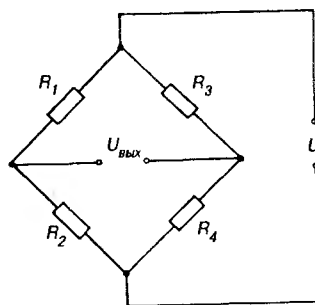


Рис. 5.7. Четырехплечий мост

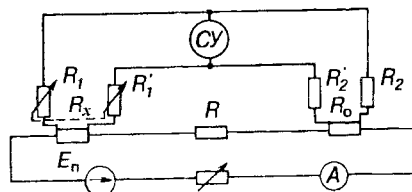


Рис. 5.8. Способы подключения измеряемого сопротивления к мосту:

а — двухпроводная схема; б — трехпроводная схема; в — четырехпроводная схема; R — сопротивление соединительного проводника; CY — сравнивающее устройство

Обычно мост приводится к равновесию плавной регулировкой R_3 . Плечи моста, содержащие R_2 и R_4 , называются плечами отношения и регулируются с кратностью 10^n ($n = \dots -2; -1; 0; +1; +2 \dots$). С помощью плеч отношения устанавливается диапазон измерений моста.

Различают три способа подключения резисторов, сопротивление которых необходимо измерить, к одинарному мосту: по двух-, трех- и четырехпроводной схемам (рис. 5.9). Двухпроводная схема (рис. 5.9, а) применяется при измерении сопротивлений средних и больших значений (более 10 Ом); трехпроводная схема (рис. 5.9, б) — при измерении небольших изменений сопротивления резистора, удаленного от моста на некоторое расстояние. Обычно эта схема применяется в технике измерения неэлектрических величин электрическими методами, например температур посредством термометров сопротивления. Четырехпроводная схема (рис. 5.9, в) применяется для измерения низкоомных сопротивлений (менее 10 Ом).

Наиболее точное измерение низкоомных сопротивлений (менее 10 Ом) производится двойным мостом (рис. 5.8). Резистор, сопротивление R_x которого необходимо измерить, включается последовательно с опорным резистором, значение сопротивления R_0 которого выбирается одного порядка со значением R_x , и подключается к источнику питания. При равновесии моста справедливо

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} + R \frac{R_1}{R + R'_1 + R'_2} \left(\frac{R'_2}{R_2} - \frac{R'_1}{R_1} \right).$$

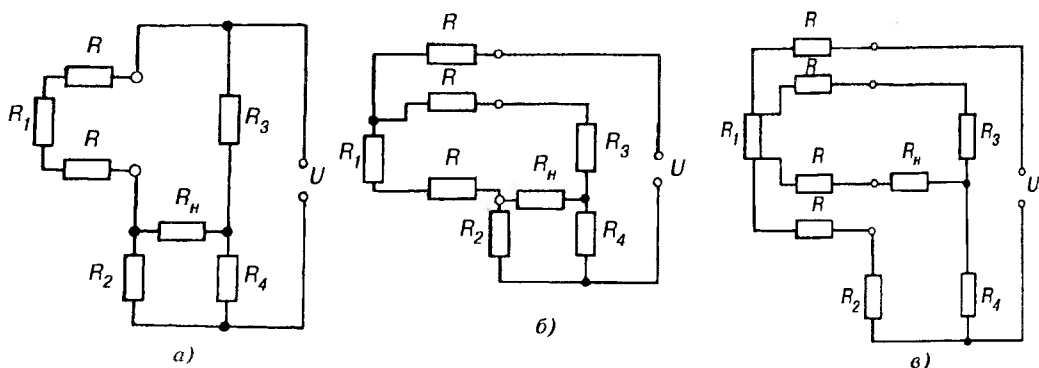


Рис. 5.9. Способы подключения измеряемых сопротивлений

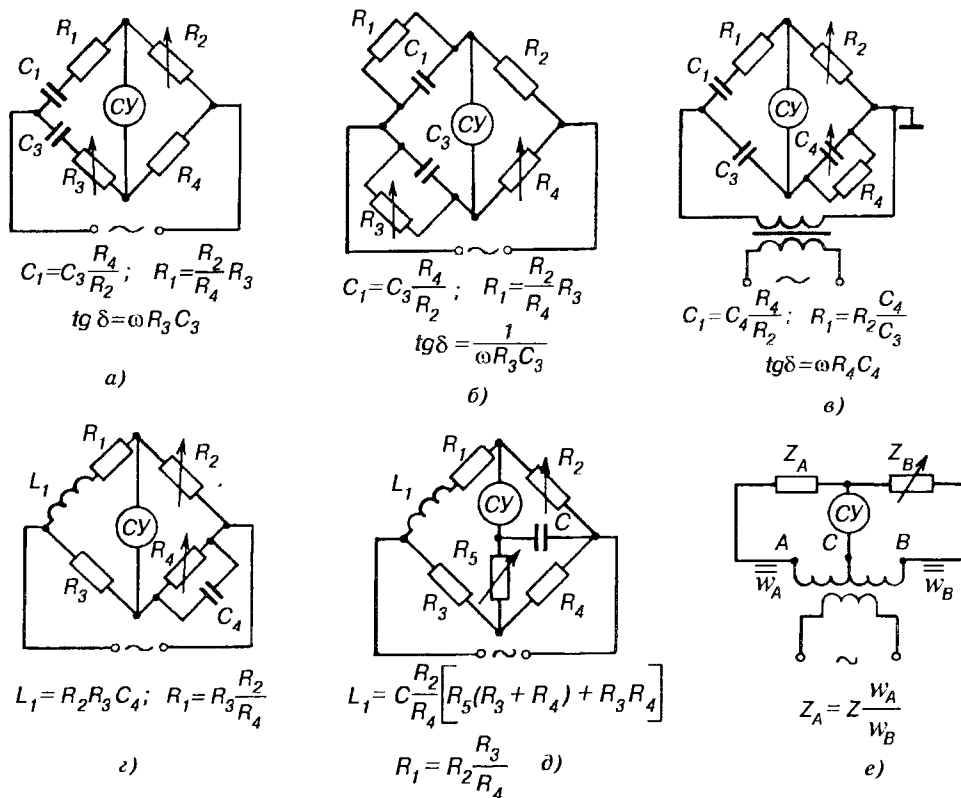


Рис. 5.10. Схемы мостов переменного тока

где R — сопротивление проводника, соединяющего R_x с R_0 .

В схеме моста выполняются условия: $R_1 = R'_1$ и $R_2 = R'_2$; кроме того, проводник в цепи моста, соединяющий R_x с R_0 , выбирают коротким и большого сечения, чтобы снизить значение R и его влияние на результат измерения. При этом уравнение равновесия упрощается:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}$$

Схемы мостов переменного тока более разнообразны. На рис. 5.10, а-е представлены некоторые варианты мостов и уравнения для определения измеряемых параметров при условии, что мост уравновешен. Поскольку измеряемые величины характеризуются двумя параметрами (C_x и $\operatorname{tg} \delta$; L_x и R_x) и уравнение равновесия моста распадается на два отдельных уравнения, то уравновешивание мостов производится двумя элементами.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Измерение мощности в цепях постоянного и переменного тока, в том числе трехфазных, трех- и четырехпроводных производится электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами.

Электродинамические ваттметры имеют классы точности 0,1; 0,2; 0,5; ферродинамические 1,0; 1,5; 2,5. Последние применяются при технических измерениях. Область применения электродинамических ваттметров — цепи постоянного и переменного тока с частотой до нескольких тысяч герц, ферродинамических ваттметров — ограничена цепями промышленной частоты 50 Гц. Измерение мощности на высоких частотах производится электронными ваттметрами. Если ваттметр имеет неградуированную шкалу, что бывает у многодиапазонных ваттметров, то перед его применением вычисляется постоянная ваттметра (цена деления) $C_{\text{ном}}$ по формуле

$$C_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{a_{\text{ном}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение выбранного поддиапазона измерения; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток выбранного поддиапазона измерения; $a_{\text{ном}}$ — номинальное число делений шкалы ваттметра.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По определению мощность нагрузочного устройства есть произведение тока I и напряжения U на нем:

$$P = UI.$$

Отсюда следует, что мощность может быть измерена путем раздельного измерения напряжения и тока и последующего вычисления. Однако на практике предпочтение отдается одноэлементным электродинамическим ваттметрам. Возможны две схемы включения ваттметра: для измерения мощности высокоомного нагрузочного устройства (рис. 5.11, а), и измерения мощности низкоомного нагрузочного устройства (рис. 5.11, б).

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Измерение активной мощности в однофазных цепях переменного тока производится одним одноэлементным ваттметром, который включается аналогично рис. 5.11. При измерениях в трехфазных

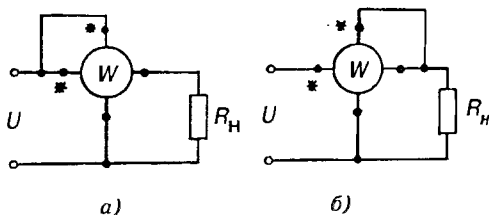


Рис. 5.11. Схемы включения ваттметра

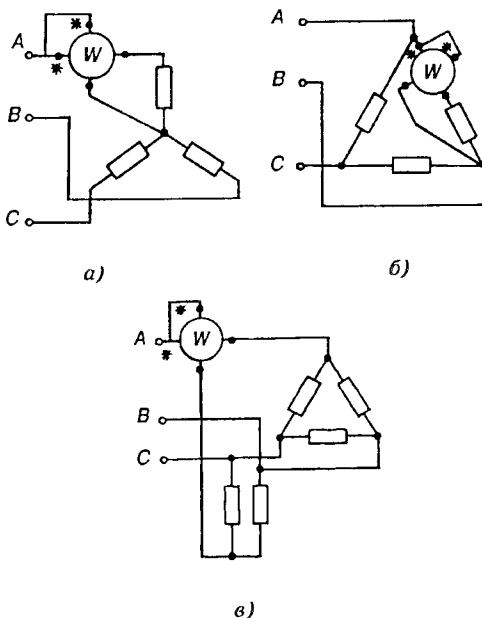


Рис. 5.12. Схемы включения одного ваттметра для измерения активной мощности:

а — для нагрузки, соединенной в звезду; б — для нагрузки, соединенной в треугольник; в — для нагрузки с недоступной средней точкой

цепях также используются одноэлементные ваттметры, но количество приборов может быть разным: один, два или три. В соответствии с этим различают методы измерений одного, двух или трех приборов. Технические измерения в трехфазных цепях производятся обычно посредством специальных двух- или трехэлементных ваттметров. Расширение диапазона измерения производится посредством трансформаторов тока и напряжения.

В симметричной трехфазной трехпроводной цепи измерение активной мощности возможно одним прибором, включенным, как показано на рис. 5.12. На рис. 5.12, в показано включение ваттметра, если средняя точка недоступна. В таком случае искусственная средняя точка создается с помощью двух резисторов, сопротивление которых равно сопротивлению параллельной обмотки ваттметра. Полная мощность трехфазной цепи во всех трех вариантах включения ваттметра определяется по формуле

$$P = 3 P_W,$$

где P_W — показание ваттметра.

Метод двух приборов применяется для измерения активной мощности в трехфазной трехпроводной цепи и предполагает включение двух одноэлементных ваттметров (рис. 5.13). Результат измерения не зависит от схемы соединения резисторов нагрузочного устройства. По этой же схеме включается и двухэлементный ваттметр.

Сумма показаний обоих ваттметров равна полной мощности трехфазной цепи:

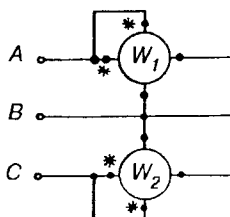


Рис. 5.13. Схема включения двух ваттметров для измерения активной мощности

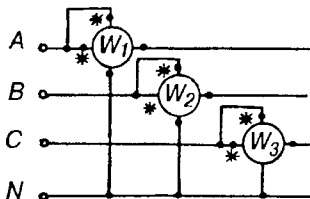


Рис. 5.14. Измерение активной мощности методом трех ваттметров

$$P = P_{W1} + P_{W2} = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi.$$

Метод трех приборов применяется для измерения активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи. Схема включения ваттметров показана на рис. 5.14. По этой же схеме производится включение трехэлементных трехфазных ваттметров.

Полная мощность равна сумме показаний всех ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}.$$

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ

В соответствии с определением электрическая энергия W выражается уравнением

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt,$$

где P — мощность нагрузочного устройства.

Измеряется энергия электрическими счетчиками.

Электрическая схема счетчика во многом совпадает со схемой ваттметра: в ней, так же как и в схеме ваттметра, содержатся две цепи — последовательная и параллельная. Первая включается последовательно с нагрузкой, по ней протекает ток нагрузки. Вторая включается параллельно нагрузке, к ней приложено напряжение, действующее на нагрузку.

Измерение электрической энергии производится: в цепях постоянного тока — счетчиками с измерительными механизмами магнитоэлектрической, ферродинамической или электродинамической системы;

в цепях переменного тока промышленной частоты — счетчиками индукционной системы либо электронными счетчиками;

в цепях переменного тока высокой частоты — электронными приборами.

Схемы включения счетчиков электрической энергии совпадают с аналогичными схемами включения ваттметров.

5.3. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

ОБЩИЕ СВОЙСТВА

Электроизмерительные приборы выпускаются отечественной промышленностью для измерения более 50 электрических величин и классифицируются:

по способу представления результатов измерения — показывающие и регистрирующие;

по способу организации отсчетного устройства — аналоговые (шкала в пределах диапазона измерений непрерывная) и цифровые (шкала в пределах диапазона измерений квантованная);

по используемой элементной базе — электромеханические и электронные приборы;

по способу применения и конструкции — щитовые, переносные и стационарные.

По способу защиты от воздействия внешних влияющих величин приборы делятся на обыкновенные, водо-, газо-, пылезащищенные, герметические, взрывобезопасные.

По стойкости к механическим воздействиям приборы делятся на обыкновенные с повышенной прочностью, тряскопрочные, нечувствительные к тряске, вибропрочные, нечувствительные к вибрации.

В настоящее время единой системы обозначения типов приборов не существует. Для этих целей в группе электронных приборов часто используются следующие обозначения:

- B1 — приборы для проверки вольтметров;
- B2 — вольтметры постоянного тока;
- B3 — вольтметры переменного тока;
- B4 — вольтметры импульсные;
- B6 — вольтметры селективные;
- B7 — вольтметры универсальные;
- E6 — омметры;
- E7 — измерители параметров электрической цепи;
- Ч3 — частотомеры электронно-счетные;
- C1 — осциллографы универсальные;
- СК4 — анализаторы спектра;
- C7 — осциллографы скоростные (стробоскопические);
- C8 — осциллографы запоминающие;
- C9 — осциллографы цифровые;
- Г2 — генераторы шума;
- Г3 — генераторы сигналов низкочастотные;
- Г4 — генераторы сигналов высокочастотные;
- Г5 — генераторы импульсов;
- Г6 — генераторы сигналов специальной формы;

на ряде приборостроительных предприятий также используют буквы Р, Ф или Ш.

Примеры обозначений электронных приборов: В3-60 — вольтметр переменного тока модели 60; Ф285 — цифровой вольтметр модели 285.

Многие типы современных электронных приборов разработаны с использованием микропроцессорной элементной базы, при этом достигаются: расширение функциональных возможностей прибора, автоматизация процесса измерения и обработки результатов измерений, диагностика

неисправностей. Такие приборы часто ориентируются на использование в составе автоматизированных измерительных систем и с этой целью снабжаются интерфейсом КОП (канал общего пользования, ГОСТ 26.003-80).

Среди приборов электромеханической группы тип прибора обычно обозначается буквой, отражающей систему измерительного механизма: М — магнитоэлектрические; Э — электромагнитные; Д — электродинамические; В — вибрационные; Т — с термоэлектрическими преобразователями; Ц — содержащие выпрямители; Н — самопишущие. Для обозначения электрических счетчиков переменного тока применяют следующие буквы и цифры: С — счетчик; А — активной энергии; Р — реактивной энергии; О — однофазный; 3 или 4 — для трех- или четырехпроводной сети; У — универсальный; И — индукционный; Д — с датчиком импульсов.

Примеры обозначений приборов электромеханической группы: М 900 — прибор магнитоэлектрической системы модели 900, СА3-И670Д — счетчик активной энергии, трехфазный, индукционный, модели 670, с датчиком импульсов.

Ниже представлены технические характеристики ряда аналоговых и цифровых измерительных приборов.

АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Аналоговые измерительные приборы являются наиболее многочисленной группой среди измерительных приборов. Они применяются как в лабораторных и цеховых условиях, так и в условиях с широким диапазоном изменений влияющих величин. Этим объясняется большое разнообразие конструкций приборов.

Структурная схема аналогового измерительного прибора содержит последовательно включенные измерительные преобразователи, снабженные отсчетным устройством. По виду используемой элементной базы различают электронные и электромеханические аналоговые приборы.

Основу структурной схемы аналоговых электронных приборов составляют электронные преобразователи, свойства которых и определяют основные свойства приборов. Такие приборы обладают малой инерционностью и позволяют исследовать быстро протекающие процессы; они отбирают малую энергию от источника измеряемого сигнала, следовательно, обеспечивают малое значение погрешности взаимодействия. Приборы данной группы имеют широкую номенклатуру и охватывают большое число измеряемых величин: например, количество типов электронных вольтметров — более 10, электронных осциллографов — более 70 и т. д. В табл. 5.3, 5.4 приведены технические данные таких приборов.

Т а б л и ц а 5.3. Технические данные электронных вольтметров и омметров

Тип прибора	Диапазон измеряемых величин	Количество пределов измерений	Диапазон частот, Гц	Пределы основной погрешности, %	Входное сопротивление, входная емкость, МОм/пФ	Габариты, мм	Масса, кг
В3-36	$3 \cdot 10^{-3} — 300$ В	10	$10^4 — 10^9$	$\pm (4-25)$	0,08/1,5 (с пробником) 0,11/3,5 (с делителем)	318×206×328	6
В3-38Б	$10^{-4} — 300$ В	10	$20-5 \cdot 10^6$	$\pm (2,5-6)$	4/25 (1—300 мВ) 5/15 (1—300 В)	152×206×285	3
В3-55А	$10^{-4} — 300$ В	10	$20-5 \cdot 10^6$	$\pm (2,5-4)$	1,2/28	162×98×293	2
В3-56	$10^{-4} — 300$ В	10	$10-15 \cdot 10^6$	$\pm (2,5-15)$	4/300 (1—300 мВ) 1/15 (с делителем)	171×209×332	6
В3-57	$10^{-5} — 300$ В	10	$5 — 5 \cdot 10^6$	+ (1-4)	5/27 (0,03—300 мВ) 5/12 (1—300 В)	328×168×206	6,2
В7-36	$10^{-3} — 2 \cdot 10^{-4}$ В $0,03 — 10^3$ В $10^6 — 10$ А $10^{-8} — 10$ А $10 — 10^7$ Ом	—	$20-10^9$ $20 — 10^3$	$\pm (2,5-4)$ $\pm (2,5-4)$ $\pm 2,5$ ± 4 $\pm 2,5$	11 / 50 11 / 2 — — —	162×293×117	2,2
Е6-13А	$10 — 10^{14}$ Ом	22	—	$\pm (2,5-10)$	—	Прибора: 152×206×290 Измерительной камеры: 150×120×250	5 2,5
Е6-16	$2 — 2^8$ Ом	5	—	$\pm 1,5$	—	120×205×90	1,9
Е6-17	$10 — 3 \cdot 10^{10}$ Ом	18	—	$\pm (1,5-6)$	—	250×210×210	6
Е6-18	$10^{-4} — 100$ Ом	—	—	$\pm 1,5$	—	230×206×165	3,6

Т а б л и ц а 5.4. Электронные осциллографы

Тип прибора	Количество каналов	Диапазон исследуемых напряжений, В	Вертикальное отклонение				Горизонтальное отклонение		Рабочая часть экрана	Габариты, мм	Масса, кг	Особенности прибора
			Полоса пропускания, МГц	Время нарастания, нс	Коэффициент отклонения, В/дел.	Пределы основной погрешности, %	Входное сопротивление, Ом/емкость, пФ	Коэффициент развертки, с/дел.	Предел основной погрешности, %			
С1-85	1	0,01-100	0-100	—	$5 \cdot 10^{-23}-2$	± 3	1/20	$5 \cdot 10^{-9}-0,2$	± 3	100×120	300×200×420	18 Результат измерения выводится в виде цифры на экран ЭЛТ или во внешние устройства
С1-97	2	—	0-350	1	$5 \cdot 10^{-3}-0,5$	± 3	50 Ом 0,1/4	$10^{-9}-0,1$	± 4 ± 6	80×100	360×200×420	18 Исследование быстро протекающих процессов
С1-115	2	—	0-50	—	$5 \cdot 10^{-3}-5$	± 4	1/20	$5 \cdot 10^{-9}-0,05$	± 4	100×120	228×540×320	20 Знаковая индикация на экране ЭЛТ
С1-116	1	0,01-100	0-250	—	$5 \cdot 10^{-3}-2$	± 3	1/15 или 50 Ом	$10^{-8}-10^{-1}$	± 5	80×100	360×210×460	15 Встроенный мультиметр и микропроцессор
С1-118	1	$5 \cdot 10^{-3}-300$	0-10	35	$5 \cdot 10^{-3}-5$	± 5	1/30	$5 \cdot 10^{-7}-0,05$	± 5	60×80	120×210×310	4 Малые габариты и масса
С1-121	4	—	0-100	—	$2 \cdot 10^{-3}-10$	± 3	—	$2 \cdot 10^{-9}-1$	± 3	100×120	177×427×550	25 Снабжен КОП для работы с персональным компьютером
С1-126	4	$4 \cdot 10^{-3}-300$	—	—	$5 \cdot 10^{-3}-5$	± 3	—	$2 \cdot 10^{-8}-0,2$	± 3	80×100	300×180×420	10 Малые габариты
С7-17	2	—	0-600	0,5	$2 \cdot 10^{-3}-0,2$	$\pm (1-4)$	50 Ом	$10^{-10}-5 \cdot 10^{-5}$	$\pm (1-4)$	100×120	480×200×550	27 Режим работы: автономный в комплекте с ПЭВМ
С8-17	2	$6 \cdot 10^{-3}-500$	0-1	350	$1 \cdot 10^{-3}-5$	± 3	1/42	$2 \cdot 10^{-7}-1$	± 3	60×80	300×180×480	16 Время воспроизведения 30 мин
С9-16	2	АЦП-8 разрядов	—	—	—	$\pm 1,5$	—	—	$\pm 0,2$	—	480×200×555	30 Максимальная частота дискретизации 20 МГц, снабжен КОП, емкость памяти 4096 байт
С9-19	3	$2 \cdot 10^{-3}-250$	0-7,5 0-100	—	—	± 2	—	—	$\pm 0,1$	—	440×440×177	18 Максимальная частота дискретизации 20 МГц, емкость памяти на канал 2048 байт, автоматическая обработка сигналов, снабжен КОП
С9-28	2	$5 \cdot 10^{-3}-50$	0-100	—	—	± 2	—	—	± 2	100×120	440×330×177	— Максимальная частота дискретизации 20 МГц, АЦП—8 бит, емкость памяти 512 байт на канал, снабжен КОП

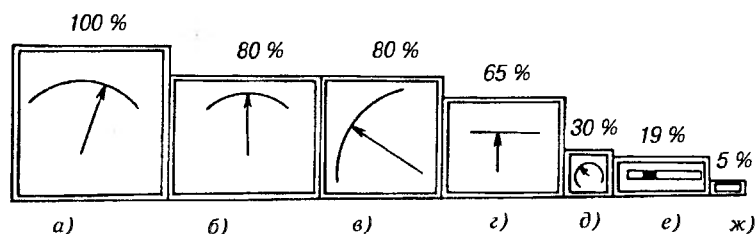


Рис. 5.15. Расположение измерительного механизма по отношению к лицевой части прибора

Основу структурной схемы электромеханических приборов составляет измерительный механизм, в котором измеряемая величина преобразуется в отклонение указателя по шкале прибора. По конструкции измерительного механизма различают приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, ферродинамической, электростатической, индукционной и некоторых других систем. Приборы магнитоэлектрической системы применяются для измерения постоянных или медленно изменяющихся токов и напряжений. Приборы других систем, как правило, предназначены для измерения параметров переменных токов и напряжений, но в отдельных случаях могут применяться и для измерения постоянных токов и напряжений.

Аналоговые электромеханические приборы делятся на щитовые, переносные и стационарные. Стационарные и переносные приборы имеют сравнительно узкую область применения и активно вытесняются цифровыми приборами, поэтому они далее не рассматриваются. Щитовые приборы изготавливаются для измерения 18 электрических величин, применяются как в лабораторных и цеховых условиях, так и в широком диапазоне изменений внешних условий. Этим объясняется большое разнообразие конструкций щитовых приборов.

В зависимости от расположения измерительного механизма по отношению к корпусу прибора и размеров лицевой части все приборы делятся на группы (рис. 5.15):

панорамные, измерительный механизм расположен в центре одной из сторон, угол отклонения указателя более 100° (рис. 5.15, а, б);

квадратные, измерительный механизм расположен в углу, угол отклонения указателя 90° (рис. 5.15, в);

профильные, измерительный механизм расположен за шкалой, его ось параллельна плоскости шкалы (рис. 5.15, г);

узкопрофильные, измерительный механизм также расположен за шкалой, но указатель значе-

ния измеряемой величины выполнен в виде светового пятна (рис. 5.15, е);

круглошкальные, измерительный механизм находится в центре прибора, угол отклонения указателя более 230° (рис. 5.15, д);

проекционные, с подвижной шкалой, проектируемой на небольшой экран (рис. 5.15, ж).

В зависимости от размеров лицевой части приборы делятся на миниатюрные, малого, среднего и большого габаритов. Наибольший размер лицевой части и габаритные размеры приборов представлены в табл. 5.5.

Предельные возможности измерения щитовыми приборами различных величин представлены в табл. 5.6. Прочерки указывают на отсутствие приборов для измерения данной величины. Указанная в таблице точность является предельной для данного габаритного размера прибора.

На практике измерительные задачи наиболее часто решаются с помощью приборов среднего габарита. Ниже представлены технические данные некоторых типов щитовых приборов среднего габарита (табл. 5.7—5.9, 5.11).

Важной группой щитовых аналоговых измерительных приборов являются самопишущие приборы, технические данные которых указаны в табл. 5.10 и 5.12.

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Отличительная черта цифрового измерительного прибора — наличие в его конструкции цифрового отсчетного устройства. Основной элементной базой цифровых приборов является микроэлектроника, в том числе микропроцессоры. Цифровые приборы обладают высокими метрологическими характеристиками и высоким уровнем автоматизации измерительных процедур. Многие типы цифровых приборов построены с учетом возможности их использования в автоматизированных измерительных системах и с этой целью снабжены интерфейсом КОП.

Т а б л и ц а 5.5. Габаритные размеры щитовых электромеханических приборов

Характеристика прибора	Прибор			
	миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Наибольший размер лицевой части, мм	50	50 — 100	100 — 200	Свыше 200
Габаритные размеры, мм	От 20×20×37 или 21×18×28 до 46×47×79	От 30,5×65,5×83 до 100×100×115	От 20×105×80 до 175×160×110	От 144×226×136 до 450×490×120

Т а б л и ц а 5.6. Пределные возможности измерения величин щитовыми приборами

Измеряемая величина	Предел измерения	Единица величины	Прибор			
			миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Ток постоянный	Нижний	мкА	10	5	0,5	0,2
	Верхний:					
	прямое включение	А	10	20	50	20
	с наружным шунтом	кА	6,0	7,5	7,5	7,5
	с трансформатором постоянного тока	кА	—	—	150	70
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Ток переменный промышленной частоты (50 Гц)	Нижний	мкА	—	25	25	5
	Верхний:					
	прямое включение	А	—	50	300	20
	с трансформатором тока	кА	—	6	75	6
	Класс точности	—	—	1,5	1,0	1,5
Ток переменный	Нижний	мкА	$25 \cdot 10^6$	25	1500	$5 \cdot 10^6$
	Верхний:					
	прямое включение	А	—	50	200	20
	с трансформатором тока	кА	0,3	6	6	6
	Максимальная частота	Гц	1200	$75 \cdot 10^6$	$75 \cdot 10^6$	500
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	$0,25 - 1,5$	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	1,5	1,5
Отношение токов	Отношение	—	—	1,5	—	—
	Номинальные токи	А	—	$1 - 1,5$	—	—
	Основная погрешность	%	—	4	—	—
Напряжение постоянное	Нижний	мВ	45	10	0,5	0,5
	Верхний:					
	прямое включение	В	600	600	1500	500
	с добавочным резистором	кВ	3	20	20	—
	Класс точности	—	2,5	1,5	0,5	0,5
Напряжение переменное промышленной частоты (50 Гц)	Нижний	В	30	0,5	0,5	30
	Верхний:					
	прямое включение	В	250	6000	3000	450
	с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	600	30
	Класс точности	—	1,5	1,0	1,0	1,5
Напряжение переменное	Нижний	В	45	0,5	0,5	30
	Верхний:					
	прямое включение	В	250	600	3000	450
	с трансформатором напряжения	кВ	—	7,5	450	—
	Максимальная частота	кГц	1,2	10	$2 \cdot 10^4$	10
	Инфранизкая частота	Гц	—	—	$0,25 - 1,5$	—
	Класс точности	—	2,0	1,0	1,0	1,5
Сопротивление изоляции	Нижний	МОм	—	1,0	1,0	—
	Верхний	МОм	—	5,0	20	—
	Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
Мощность постоянного тока	Номинальный ток	А	—	—	2000	—
	Напряжение:					
	нижний	В	—	—	50	—
	верхний	В	—	—	1200	—
	Класс точности	—	—	—	2,5	—
Активная мощность однофазной сети*	Номинальный ток:					
	нижний	А	—	—	1	—
	верхний	А	—	—	50	—
	с трансформатором тока	кА	—	—	15	—
	Номинальное напряжение:					
	нижний	В	—	—	127	—
	верхний	В	—	—	220	—
	с трансформатором напряжения	кВ	—	—	380	—
	Класс точности	—	—	—	1,5	—

Окончание табл. 5.6

Измеряемая величина	Предел измерения	Единица величины	Прибор			
			миниатюрный	малого габарита	среднего габарита	большого габарита
Активная мощность трехфазной трехпроводной сети	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором тока Номинальное напряжение: нижний верхний с трансформатором напряжения Класс точности	A	—	1	1	—
		A	—	5	5	—
		кA	—	4	40	—
		B	—	127	127	—
		B	—	380	380	—
		кВ	—	0,38	500	—
Активная мощность трехфазной четырехпроводной сети	Номинальный ток: нижний верхний с трансформатором тока Номинальное напряжение: нижний верхний Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
		A	—	—	1	—
		A	—	—	5	—
		кA	—	—	15	—
		B	—	—	220	—
		B	—	—	2,5	—
Реактивная мощность трехфазной трехпроводной сети	Номинальный ток: нижний высший с трансформатором тока Номинальное напряжение: нижний с трансформатором напряжения высший Класс точности	—	—	—	2,5	—
		A	—	—	1	—
		A	—	—	5	—
		кA	—	—	15	—
		B	—	—	127	—
		кВ	—	—	500	—
Коэффициент мощности	Нижний Верхний Класс точности	B	—	—	380	—
		—	—	—	2,5	—
		—	—	—	0,5—1—0,5	—
		—	—	0—1—0	0—1—0	—
Частота переменного тока	Нижний Верхний Класс точности	—	—	2,5	1,5	—
		Гц	350—450	47—52	5—60	—
		Гц	350—900	45—2600	45—550	—
		—	4	1,1	2,5	—
Количество электричества	Нижний Верхний Основная погрешность	мКл	—	—	30	—
		мКл	—	—	150	—
		%	—	—	5	—

* Выпускается ваттметр инфранизкой частоты среднего габарита

Таблица 5.7. Типы, системы и назначение щитовых аналоговых приборов

Тип прибора	Система	Назначение, область применения
M900, M366	Магнитоэлектрическая	Измерение постоянных токов и напряжения
Э377, Э378	Электромагнитная	Измерение переменных токов и напряжения
Д307	Электродинамическая	Измерение мощности в однофазных цепях переменного тока частотой 50 Гц; применяется для комплектования щитов электростанций и пультов управления
Д335, Д335/1	Ферродинамическая	Измерение активной и реактивной мощности в трехфазных, трехпроводных цепях переменного тока частотой 50 Гц
О323	Ферродинамическая	Измерение активной мощности в трехфазных, четырехпроводных цепях переменного тока частотой 50 Гц с равномерной и неравномерной нагрузкой фаз; применяется для комплектования щитов электростанций и пультов управления
Д362, Д363, Д364	Ферродинамическая (логометр)	Измерение коэффициента мощности в двухпроводных (однофазных) цепях (Д362) и трехфазных цепях (Д363, Д364) переменного тока частотой 50 Гц
Э371, Э372	Электромагнитная (логометр)	Измерение частоты в цепях переменного тока

Т а б л и ц а 5.8. Параметры приборов типа М900

Микроамперметры, милливольтметры		Микроамперметры	Милливольтметры
Диапазон измерения, мкА; мВ	Класс точности	Внутреннее сопротивление, Ом	Сопротивление внешней цепи, Ом, не менее
0 — 10 0 — 15 0 — 20 0 — 25	1,0; 1,5	5000 5000 5000 800	12,5 4,5 4 4
5—0—5 10 — 0 — 10	1,5	5000 500	12,5 4

Т а б л и ц а 5.9. Основные параметры щитовых аналоговых приборов

Наименование и тип прибора	Класс точности	Рабочая частота, Гц	Количество пределов измерений	Пределы измерения; диапазон измерения (предел на перегрузочной части шкалы); номинальное напряжение (диапазон измерений)	Способ включения
Амперметр М366	1,0	—	Многопредельный	75 — 150 — 300 — 750 мкА 1,5 — 3 — 7,5 — 15 мА 15 — 30 — 75 — 150 мА 75 — 150 — 300 — 750 мА 1,5 — 3 — 7,5 — 15 А	Непосредственный
Вольтметр М366	1,0	—	Многопредельный	1,5 — 3 — 7,5 — 15 В 30 — 75 — 150 — 300 В 150 — 300 — 600 — 750 В 1000 В	
Киловольтметр М366	1,0	—	Однопредельный	1,5; 3; 4,5 кВ с добавочным резистором	
Амперметр Э377	1,0	50	Однопредельный	1,5; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 100; 500 мА 1; 2; 3; 5; 10; 20 А	
			Многопредельный	3 — 7; 5 — 15; 15 — 30 — 75 — 150; 300 — 750 — 1500 мА. 1,5 — 3 — 7,5 — 15 А	
Амперметры Э377, Э378	1,5	50 или 60	Однопредельный	1,5; 2; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 100; 250; 500; 750 мА 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30 50; 75; 100; 150; 200; 300 А	Через трансформатор с вторичным током 1 или 5 А
				5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 750; 800 А 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 15 кА	
Амперметры перегрузочные Э377, Э378	1,5 В области перегрузок основная погрешность не более 6% разности конечных значений перегрузочной шкалы и предела измерений	50 или 60	Однопредельный	0,2 — 1 (6); 0,6 — 3 (20); 1 — 5 (30); 2 — 10 (60); 3 — 15 (80); 4 — 20 (100); 6 — 30 (200); 10 — 50 (300) А 1 — 5 (30); 2 — 20 (60); 3 — 15 (80); 4 — 20 (100); 6 — 30 (200); 8 — 40 (600); 30 — 150(800); 40 — 200(1000); 60 — 300(2000); 80 — 400(2500); 120 — 600 (3000); 150 — 800 (4000); 200 — 1000(6000); 300 — 1500 (8000); 600 — 3000(20 000) А 0,8 — 4(25); 1 — 5(30); 1,2 — 6(30); 1,5 — 8(40); 2 — 10(60); 3 — 15(90); 5 — 25(150) кА	Непосредственный

Продолжение табл. 5.9

Наименование и тип прибора	Класс точности	Рабочая частота, Гц	Количество пределов измерений	Пределы измерения; диапазон измерения (предел на перегрузочной части шкалы); номинальное напряжение (диапазон измерений)	Способ включения
Амперметры Э377, Э378	1,5	200 500	Однопределный	50 А 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300 А	Непосредственный
Амперметры Э377	1,5	1000	—	100; 600 мА 1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50; 100 А	
Вольтметры Э377	1,5	50	—	1; 1,5; 3; 7,5; 15; 30; 150; 250; 500; 600 В	
Вольтметры номинального напряжения Э377	1,5	50	—	36(30 — 40); 100(90 — 120); 127(110 — 150); 220(180 — 250); 380(320 — 420) В	
Вольтметры Э377	1,5	50	Многопределный	7,5 — 15; 75 — 150; 30 — 300; 150 — 300 — 600 В	
Вольтметры Э377, Э378	1,5	50 или 60	Однопределный	0,5; 1; 1,5; 3; 15; 30; 50; 75; 100; 250; 500; 600 В	Через трансформатор напряжения с вторичным напряжением 100 В
				450; 600; 750 В 3; 5; 7,5; 12,5; 15; 17,5; 20; 35; 40; 125; 250; 400; 600 кВ	
Вольтметры Э377, Э378	1,5	200	Однопределный	250 В	Непосредственный
Вольтметры Э377, Э378	1,5	500	—	15; 30; 50; 150; 250; 500; 600 В	
Вольтметры Э377	1,5	1000	—	10; 15; 30; 50; 150; 250; 500; 600 В	
Ваттметры	1,5	50	—	Номинальные значения: напряжения 127; 220; 380 В тока 5 А	
				Расширение пределов измерения	Через трансформаторы тока (1; 5 А) и напряжения (100 В)
Ваттметры, варметры Д335, Д335/1	1,5	50	Номинальное значение коэффициента мощности $\cos \varphi = 1$ $\sin \varphi = 1$	Номинальные значения: напряжения 127; 220; 380 В тока 5 А	Непосредственный
				Расширение пределов измерения	Через трансформаторы тока (1; 5 А) и напряжения (100 В)
Ваттметры Ф323	2,5	50	$\cos \varphi = 1$	Номинальные значения: напряжения 220 и 38 В тока 5; 10; 15; 20; 30 и 40 А	Непосредственный
				Расширение пределов измерения	Через трансформаторы тока (1; 5 А) и напряжения (100 В)

О к о н ч а н и е т а б л . 5 . 9

Наименование и тип прибора	Класс точности	Рабочая частота, Гц	Количество пределов измерений	Пределы измерения; диапазон измерения (предел на перегрузочной части шкалы); номинальное напряжение (диапазон измерений)	Способ выключения
Фазометры: Д362 Д363 Д364	1,5 1,5 25	50	—	Д362, Д363: $\cos \varphi = -0,1 \div 1 \div 0,5$ или $\cos \varphi = -0,9 \div 1 \div 0,2$ Д364: $\cos \varphi = -0,5 \div 1 \div 0,5$ Номинальные значения: напряжения 127, 220, 380 В тока 5А	Непосредственный
				Расширение пределов измерения	Через трансформаторы тока (1; 5 А) и напряжения (100 В)
Частотомеры Э371, Э372	2,5	—	—	45 — 55 Гц, 450 — 550 Гц с номинальным напряжением 127; 220; 380 В 180 — 220 Гц с номинальным напряжением 220 В	Непосредственный
				45 — 55 Гц с номинальным напряжением 100 В	Через трансформатор напряжения

Т а б л и ц а 5.10. Амперметры и вольтметры самопишущие, щитовые

Тип прибора	Измеряемая величина	Класс точности	Пределы измерения	Включение прибора	Скорость движения диаграммной ленты, мм/ч	Габариты, мм	Масса, кг
НЗ100	Постоянный ток	2,5	1; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 300 мА 0,1; 1; 2; 3; 5; 10; 15; 20; 30 А	Непосредственное	20; 60; 180; 600;1800; 5400	120×120×285	3,5
			50; 75; 100; 150; 300; 750 мА 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7,5 кА	С наружным шунтом 75 мВ			
			7,5; 10; 15; 20; 25; 35; 50; 70 кА	С трансформатором постоянного тока типа И58			
	Напряжение постоянного тока	2,5	75; 150 мВ 1,5; 3; 5; 7,5; 15; 30; 50; 75; 150; 250; 300; 500; 600; 1000 В	Непосредственное			
	Тахогенератор	2,5	(50 —1000) В; 5 мА	С тахогенератором			
НЗ44	Ток промышленной частоты (50 Гц)	1,5	0,05; 0,15; 0,5; 1,5	Непосредственное		160×160×310	6
			5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 800 А 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 15 кА	С трансформатором тока			
	Напряжение промышленной частоты (50 Гц)		150; 250; 450; 600 В	Непосредственное			
			450; 600; 750 В. 3; 5; 7,5; 12,5; 15; 17,5; 20; 25; 40; 125; 175; 250; 400; 600 кВ	С трансформатором напряжения			
НЗ43	(45 ÷ 10 000Гц)	2,5	1; 5; 15; 25; 50; 150; 250; 500 мА 1; 1,5; 2,5; 5 А	Непосредственное		160×160×245	6
			5; 15; 25; 50; 150; 250; 500 В				

Т а б л и ц а 5.11. Дополнительные параметры щитовых аналоговых приборов

Параметры	Тип прибора						
	М900	М366	Э377, Э378	Д307	Д335, Д335/1	Ф323	Д362, Д363, Д364
Диапазон рабочих температур, °C	От -30 до +40	от 10 до 40	От -40 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50
Рабочее положение	Вертикальное и горизонтальное	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное	Вертикальное
Изменение показаний, %: при отклонении окружающей температуры на каждые 10°C в пределах рабочих температур	±1 ±0,9 для приборов класса 1,0; ±1,2 для приборов класса 1,5	±1	±0,5 для приборов класса 1,0; ±0,8 для приборов класса 1,5	±0,8	±1,5	±1,2	±0,8 для Д362 и Д363 ±1,2 для Д364
под воздействием внешнего магнитного поля с индукцией $5 \cdot 10^{-4}$ Тл, не более	1	±0,5	±2,5	±2,5	±2,5	±5	±5
при отклонении от вертикального положения на 45° в любом направлении	—	—	±1 для приборов класса 1,0 ±1,5 для приборов класса 1,5	±1,5	—	±2,5	±2,5
при установке прибора на ферромагнитном щите толщиной 3 мм, не более	—	—	±1 для приборов класса 1,0 ±1,5 для приборов класса 1,5	—	±1,5	±1	—
при отклонении частоты от номинальной на 10 %, не более	—	—	±1 для приборов класса 1,0 ±1,5 для приборов класса 1,5	±1,5	—	—	—
при отклонении напряжения на ±20 % от номинального значения, не более	—	—	—	±1,5	—	—	—
Стойкость к механическим воздействиям	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью	Обыкновенные с повышенной механической прочностью
Габаритные размеры, мм	170×105×64	160×160×105	Э377 160×160×105 Э378 160×160×125	160×160×75	Д335 120×120×108 Д335/1 160×160×113	160×160×74,5	Д362 120×120×108 Д363, Д364 160×160×82
Масса, кг	1	2	Э377 1,8 Э378 1,2	1,2	1,2	1,2	Д362 0,7 Д363 0,9 Д364 1
							Э371 160×160×91 Э372 120×120×89 Э371 1,8 Э372 1,2

Т а б л и ц а 5.12. Ваттметры, варметры, частотомеры и фазометры самопишущие, щитовые

Тип прибора	Измерение и непрерывная запись параметров	Класс точности	Номинальные значения токов, напряжения, частоты и коэффициента мощности	Включение прибора	Габариты, мм	Масса, кг
НЗ96	Активной мощности в цепях однофазного тока частотой 50 Гц	1,5	5 А 127; 220; 380 В	Непосредственное	160×160×360	7,5
			1; 5 А 100 В	С трансформаторами тока и напряжения		
НЗ95	Активной и реактивной мощности в цепях трехфазного тока без нулевого провода с неравномерной нагрузкой фаз частотой 50 Гц	1,5	5 А 127; 220; 380 В	Непосредственное		
			1; 5 А 100 В	С трансформаторами тока и напряжения		
НЗ97	Промышленной частоты 50 Гц	2,5	45 ÷ 55 Гц 48 ÷ 52 и 49 ÷ 51 Гц	127; 220; 380 В Непосредственное 100 В — через трансформаторы напряжения	160×160×370	8,5
НЗ98	Коэффициента мощности в однофазных сетях частотой 50 Гц	2,5	0,5 (индуктивное) — 1 — 0,5 (емкостное)	127; 220; 380 В 5 А Непосредственное		

Цифровые приборы охватывают широкий круг измеряемых величин — постоянные и переменные токи и напряжения, частоту и фазу переменных токов, параметры электрической цепи, многие неэлектрические величины с использованием соответствующих датчиков.

Структурная схема цифрового прибора содержит ряд измерительных преобразователей, посредством которых измеряемая величина преобразуется в пропорциональное значение кода, который и подается на отсчетное устройство. Эти схемы делятся на две основные группы по виду аналого-цифрового преобразователя, посредством которого измеряемая величина преобразуется в код.

Первая группа схем содержит аналого-цифровой преобразователь напряжения постоянного тока. В таком случае все виды измеряемых величин преобразуются в напряжения постоянного тока и затем в код. Причем в качестве аналого-цифрового преобразователя, как правило, используются преобразователи интегрирующего типа. Такие преобразователи являются оптимальными приемниками сигнала по критерию помехоустойчивости, что является важным качеством. Преобразователи интегрирующего типа широко применяются в различных типах вольтметров, омметров, измерителях параметров электрической цепи и с разного рода датчиками многих неэлектрических величин.

Вторая группа охватывает измеряемые величины, так или иначе связанные со временем: частоту, фазу, длительность импульса и т.п. В приборах этой группы измеряемая величина преобразуется в интервал времени, который и преобразуется в код посредством генератора стабильной частоты. Как

правило, стабилизация частоты генераторов осуществляется кварцевым резонатором с высокой точностью и стабильностью. Эта особенность и является характерной чертой цифровых приборов частотно-временной группы.

Конструктивно цифровые приборы выпускаются переносными и для встраивания в аппаратуру различного назначения. Последние обычно имеют ограниченные функциональные возможности: один вид измеряемой величины, один предел измерения и т.д. Но каждый тип такого прибора имеет ряд модификаций, которые расширяют функциональные возможности приборов.

Например:

прибор типа Ф218 снабжен дискриминатором, который сравнивает измеренное значение входной величины с двумя заданными в пределах измерения значениями (уставками); отсчетное устройство индицирует значение и местонахождение измеряемой величины относительно заданного поля допуска тремя символами «Много», «Норма», «Мало»; прибор имеет 13 модификаций различающихся видом измеряемой величины, пределом измерения, классом точности, входным сопротивлением;

прибор типа Ф219 предназначен для измерения действующих значений синусоидальных напряжений; прибор имеет девять модификаций, различающихся пределом измерения, классом точности, частотным диапазоном, входным сопротивлением;

прибор типа Ф229 имеет семь модификаций, различающихся видом измеряемой величины, пределом измерения и входным сопротивлением;

прибор типа Ф285 имеет модификации, которые питаются от источников постоянного тока

Т а б л и ц а 5.13. Частотомеры электронно-счетные

Параметр	Тип прибора			
	ЧЗ-54	ЧЗ-62	ЧЗ-65	ЧЗ-67
Диапазон измеряемых частот	0,1 Гц — 300 МГц	0,1 Гц — 10 МГц	0,01 Гц — 500 МГц	0,01 Гц — 100 МГц
Диапазон измеряемых интервалов времени и длительности импульсов, с	$10^{-7} — 10^5$	$10^{-5} — 10$; $10^{-4} — 5$	$10^{-8} — 100$; $10^{-8} — 2 \cdot 10^4$	—
Пределы основной погрешности	$\pm 2,5 \cdot 10^{-7} + 1$ ед. счета	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5} + 1$ ед. счета	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$ /время счета	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
Диапазон входных напряжений	0,1 — 100 В (0,1 Гц — 120 МГц); 0,2 — 3 В (120 — 300 МГц)	0,01 — 10 В	0,1 — 20 В	0,01 — 10 В
Потребляемая мощность, В · А	100	35	230	30
Габариты, мм	490×135×480	375×143×300	480×173×555	160×94×356
Масса, кг	16	7	30	4
Дополнительные сведения	Ручное и дистанционное управление	—	Разрешающая способность 100 пс; КОП	Встроенный микропроцессорный контроллер

напряжением 5 или 15 В, при этом обеспечивается гальваническая развязка цепей питания и входных цепей прибора, что дает возможность питать прибор от источников питания аппаратуры.

Технические данные ряда типов цифровых измерительных приборов представлены в табл. 5.13 и 5.14.

СЧЕТЧИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

Счетчики электрические предназначены для измерения расхода электрической энергии в цепях постоянного или переменного тока. Последние имеют преимущественное распространение и рассматриваются ниже.

Счетчики электрические переменного тока создаются либо на основе измерительного механизма индукционной системы, либо на основе микроэлектронной элементной базы (электронные счетчики) и применяются для учета активной и реактивной энергии переменного тока промышленной частоты 50 Гц.

Индукционные счетчики активной энергии выпускаются классов точности 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; индукционные счетчики реактивной энергии — классов 1,5; 2,0 и 3,0.

Счетчики классов точности 0,5; 1,0 и 1,5 рассчитаны на эксплуатацию при температуре окружающей среды от 10 до 35 °С и относительной влажности до 98 % (при 35 °С); счетчики классов точности 2,0; 2,5 и 3,0 — при температуре окружающей среды от 0 до 40 °С и относительной влажности до 80 % (при 25 °С).

Максимальный ток счетчика зависит от его типа и лежит в пределах 120 — 1000 % номинального значения.

Дополнительная погрешность счетчиков при изменении напряжения в пределах $\pm 10\%$, изменении частоты в пределах $\pm 5\%$, в рабочем диапазоне температур лежит в пределах $\pm (0,08 \div 0,3)\%$. Нормальное положение индукционных счетчиков — вертикальное. При отклонении от вертикального положения возникает дополнительная составляющая погрешности, значение которой лежит в пределах $\pm 0,17\%$, если отклонение от вертикали равно 1° и $\pm 1\%$, если это отклонение возрастает до 3° . Электронные счетчики представляют собой аналого-цифровое устройство с предварительным преобразованием мощности в аналоговый сигнал и его последующим преобразованием в частоту следования импульсов. Суммируются импульсы электромеханическим счетчиком. Электронные счетчики часто снабжаются двухтарифным отсчетным устройством и телеметрическим импульсным выходом. Электронные счетчики соответствуют требованиям ГОСТ 26035-83.

Трехфазный электронный счетчик типа Ф68700 является трехпроводным, трехэлементным, трансформаторным, универсальным и предназначен для измерения активной энергии в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока.

В табл. 5.15 представлены технические данные некоторых типов счетчиков электрической энергии.

Т а б л и ц а 5. 14

Параметр	Тип прибора					
	B2-34	B2-38	B3-60	B3-62	B4-17	B7-29
Измеряемые величины	$U_{=}$	$U_{=}$	$U_{\sim}$	$U_{\sim}$	$U_{\square}$	$I_{=}, U_{=}$
Пределы измерения	1—10—100—10000 В	$10^{-9} - 2$ В	10 —100 В; 1—10—100—10000 В	0,7 мВ—1000В	1—10—100—1000 В	$I_{=}=10^{-15} - 10^{-14}-10^{-13}$ А $U_{=}=10^{-2}-10^{-1}-10$ В
Пределы основной погрешности	От $\pm [0,0008+0,0003\frac{U_k}{U_x}]$ до $\pm [0,007+0,0003\frac{U_k}{U_x}]$	От (0,01—0,08) % до (0,07—0,15) %	$\pm(0,035-0,2)\%$	$\pm 1,5$	От $\pm 1,5$ до ± 5	$I_{=}$ от $\pm [5+0,6(I_k/I_x-1)]$ до $\pm [20+0,6(I_k/I_x-1)]$ $U_{=}\pm [1+0,2 \times (U_k/U_x-1)]$
Диапазон частот	—	—	20 Гц—100 кГц	10 кГц—1500 МГц	Длительность импульсов 0,2—1000 мкс, частота 0—100 Гц	—
Входное сопротивление	10^9 Ом (1,10 В) 10^6 Ом (100 В) 10^7 Ом (1000 В)	$3 \cdot 10^7$ Ом	$(1 \pm 0,1)$ МОм	100 кОм	500 кОм	10^{15} Ом
Входная емкость			100 пФ	2,5 пФ	40 пФ	0,5 пФ
Число знаков отсчета	6	От 4,5 до 5,5	5,5	3,5	4	4
Потребляемая мощность	50	70	34	2,5	80	60
Габариты, мм	490×175×355	170×480×475	488×93×475	155×205×237	490×176×475	495×140×390
Масса, кг	15	15	10	5	17	14
Особенности, наличие КОП	Высокоточные измерения	Измерение напряжений низкого уровня; КОП	Измерение напряжений гармонической формы с преобразователем средневыпрямленного значения; КОП	Измерение амплитуды одиночных видеопульсов обеих полярностей	Измерение малых токов и высокоомных сопротивлений	

Цифровые вольтметры

В7-38	В7-40 (В7-40/1-В7-40/5)	Ф218	Ф219	Ф229	Ф285, Ф288, Ф289
$U=, U_{\sim}, I=, I_{\sim}, R$	$U=, U_{\sim}, I=, I_{\sim}, R$	$U=; I=$	$U_{\sim}; I_{\sim}$	$U=; I=$	$U=; U_{\sim};$ $I=; I_{\sim}$
$U=0,2; 2; 20; 200;$ 1000 В $U_{\sim} 0,2; 2; 20; 200;$ 300 В $I=0,2; 2; 20; 200$ мА; 2 А $I_{\sim} 2; 20; 200$ 2 · 10 ³ ; 2 · 10 ⁴ кОм	$U=0,2-2-20-200-2000$ В; до 30 кВ с высоковольтным делителем $U_{\sim} 0,2-2-20-200-2000$ В; $I=, \sim 0,2-2-20-200-2000$ мА; до 10 А с шунтом; $R 0,2-2-20-2000$ кОм — 2-20 МОм	0,1-1-10-100- 1000 В; 0,1-1-10- 100 мА	0,2-2-20- 200 В, мА 0,5-5-50- 500 — 1000 В, мА	0,2-2-20- 200 В 0,02-0,2- 2 мА	0,02-0,2-2В 0,02-0,2- 2 мА
$U=$ от $\pm(0,02+0,02U_k/U_x)$ до $\pm(0,05+0,02U_k/U_x)$ $U_{\sim}$ от $\pm(0,2+0,05U_k/U_x)$ до $\pm(0,5+0,1U_k/U_x)$ $I=, \sim$ от $\pm(0,2+0,02I_k/I_x)$ до $\pm(0,5+0,05I_k/I_x)$ R от $\pm(0,05+0,02R_k/R_x)$ до $\pm(0,5+0,1R_k/R_x)$	$U=$ от $\pm[0,05+0,02(U_k/U_x-1)]$ до $\pm[0,1+0,02(U_k/U_x-1)]$ $U_{\sim}$ от $\pm[(0,6+0,1(U_k/U_x-1)]$ до $\pm[30+2(U_k/U_x-1)]$; $I=, \sim$ от $\pm[0,2+0,02(I_k/I_x-1)]$ до $\pm[2+0,1(I_k/I_x-1)]$ R от $\pm[0,15+0,05(R_k/R_x-1)]$ до $\pm(0,5+0,1(R_k/R_x-1)]$	$\pm[0,1+0,06 \times$ $\times(U_n/U_x-1)]$ $\pm 0,1+0,006$	от $\pm[0,4+0,25 \times$ $\times(X_n/X-1)]$ до $[1,0+0,5 \times$ $\times(X_n/X-1)]$	$\pm[0,25+0,15 \times$ $\times(X_n/X-1)]$	$\pm[0,2+0,1 \times$ $\times(X_n/X-1)]$
40 Гц — 10 кГц	20 Гц — 1000 МГц	—	40—10 000 Гц	—	40—10000 Гц
10 МОм ±5% при измерении $U=$; 1 МОм ±5% · 100 пФ при измерении $U_{\sim}$	(10±0,1) МОм при измере- нии $U=$; (1±0,1) МОм, 50 — 100 пФ при измерении $U_{\sim}$	$U=$ от 1 до 200 МОм	$U_{\sim} 1-$ 0,5 МОм, 100 пФ	40 МОм (0,2; 2; 20 В) 1 МОм (200 В)	—
4,5	4,5	3,5	3,5	3,5	3,5
10	30	12,5	10	3	—
242×84×265	304×80×320	80×160×250	80×160×250	60×120×150	Ф285(1/1- 5/2) 40×80×100; Ф285(6/1- 15/2), Ф288, Ф289 60×100×130
2	5,5	2,5	2	0,6	Ф285—0,4 Ф289—1
Малые габариты	Измеряет среднеквадратиче- ское значение сигнала; произ- вольной формы; КОП	Содержит встроенный дискриминатор для сигнализации выхода за установки			

Т а б л и ц а 5.15. Счетчики электрической энергии переменного тока

Тип счетчика	Пределы основной погрешности, %	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Габарит, мм	Масса, кг
Счетчики однофазные индукционные					
СО-И449	± 2	2,5; 5; 10	110; 120; 127; 220; 230; 240; 250	204×120×116	1,6
СО-И445	± 2	2,5; 5; 10; 20	110; 127; 220; 230; 240; 250	180×130×125	2,19
СО-И471	$\pm 2,5$	5; 10	127; 220	205×135×111	1,5
Счетчики активной энергии трехфазные индукционные					
СА3-И681	± 1	5; 10	220; 380	165×247×121	2,9
СА4-И682	± 1	5; 10	220; 380	165×247×121	3,6
СА3-И670Д	± 2	5; 10	127; 220; 380	282×173×121	3,1
СА4-И672Д	± 2	5; 10	220; 380	282×173×121	3,5
СА3-И677	$\pm 2,5$	20; 30; 50	127; 220; 380	294×165×121	3,1
Счетчики реактивной энергии трехфазные индукционные					
СР4У-И689	$\pm 1,5$	1; 5	100	282×220×165	4
СР4-И679	$\pm 2,5$	20; 30; 50	220; 380	294×165×121	3,7
СР4-И686	± 3	5; 10	127; 173; 190; 200; 220; 240; 290; 380; 400; 420	165×294×129	3,9
Счетчики однофазные электронные					
ЦЭ6807	± 2	5	220	66,5×132×214	1
ЕЕ3000	± 2	5	220	210×262×100	1,2
Счетчик трехфазный электронный					
Ф68700	± 1	1 или 5	100/3	175×262×90	3

5.4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Магнитные измерения составляют неотъемлемую часть всей области электрических измерений. При этом доля магнитных измерений среди других непрерывно возрастает. Объясняется это все более широким использованием магнитных явлений в науке и технике, значительным ростом выпуска ферромагнитных материалов и применением их в электротехнических устройствах.

В основе классификации методов измерения параметров магнитного поля лежит физическая сущность явлений, используемых для измерительного процесса — преобразования магнитной величины в электрический сигнал.

В связи с этим различают индукционные методы измерения магнитных величин; методы, основанные на взаимодействии двух магнитных полей; методы, основанные на влиянии магнитного поля

на физические свойства вещества [5.7]. На рис. 5.16 представлена классификационная схема наиболее распространенных методов измерения магнитного потока Φ , магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H .

Сущность индукционного метода измерения заключается в возникновении ЭДС в витках катушки при изменении сцепленного с ними магнитного потока Φ . ЭДС e связана с потокоцеплением Ψ соотношением

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - w \frac{d\Phi}{dt},$$

где w — количество витков катушки.

Если магнитное поле однородное, то магнитный поток находится из выражения

$$\Phi = \int \frac{1}{w} e dt = BS,$$

где S — площадь сечения катушки.



Рис. 5.16. Классификация методов измерения магнитных величин

В воздушной среде B связана с H соотношением

$$B = \mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Следовательно, индукционный метод измерения позволяет определить магнитный поток, магнитную индукцию и напряженность магнитного поля

$$\Phi = \frac{1}{w} \int e \, dt; \quad B = \frac{1}{wS} \int e \, dt;$$

$$H = \frac{1}{wS\mu_0} \int e \, dt.$$

При измерении переменного магнитного потока стационарной катушкой уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(\Phi_{\max}, \omega),$$

где E — действующее значение ЭДС; $\Phi_{\max}$ — максимальное значение магнитного потока; ω — угловая скорость поля.

Для импульсных преобразователей (выдергивание катушки из постоянного поля, импульсное изменение магнитного потока при стационарной катушке) уравнение преобразования выглядит как

$$rQ = \Delta\Psi = \int e \, dt,$$

где $\Delta\Psi$ — изменение потокосцепления; Q — количество электричества; r — сопротивление измерительной цепи.

Вращение измерительной катушки в постоянном магнитном поле приводит к уравнению вида

$$E = f(\Phi, \omega).$$

При измерении магнитной индукции катушками с изменяющимся сечением на основе пьезострикционного эффекта уравнение преобразования имеет вид:

$$E = f(B, \omega).$$

Из гальваномагнитных эффектов в технике магнитных измерений нашли применение эффекты Холла и магниторезистивный (см. § 2.1).

Особое воздействие магнитного поля на поведение элементарных частиц заключается в избирательном поглощении или излучении электромагнитных волн веществом. Различают в зависимости от природы частиц ядерный магнитный, электронный парамагнитный и ферромагнитный резонанс.

Сущность ядерного магнитного резонанса за-

ключается в резонансном поглощении веществом электромагнитного излучения при переходах ядер на соседние энергетические уровни [5.8]. Изменение энергии ΔE , вызванное переходами ядер между энергетическими уровнями, связано с частотой электромагнитного поля, имеющего круговую поляризацию в направлении, перпендикулярном B . Взаимодействие между системой ядер и электромагнитным полем наступает в случае, когда частота последнего имеет определенное значение

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\gamma}{2\pi} B,$$

где γ — гиромагнитное отношение; h — постоянная Планка.

Картина взаимодействия прецессирующих магнитных моментов с вращающим магнитным полем амплитуды $H_{\max}$ представлена на рис. 5.17. Если угловая скорость поля ω соответствует резонансному значению ω_0 , то образующие поперечные составляющие намагниченности $M_{\perp}$ вектора $\vec{M}$ определяют резонансную частоту.

Сущность электронного парамагнитного резонанса принципиально не отличается от рассмотренного ядерного магнитного резонанса. Отличие состоит лишь в резонансной частоте.

Особенность ферромагнитного резонанса заключается в том, что здесь приходится иметь дело с группой атомов, связанных обменным взаимодействием. Вокруг вектора B прецессирует момент домена, и в результате резонансное поглощение на несколько порядков больше, чем у парамагнитных веществ.

Известно, что при одновременном воздействии постоянного и переменного магнитного поля изменяются характеристики ферромагнитных материалов. На этом принципе основан метод измерения параметров магнитного поля с помощью так называемых феррозондовых (магнитомодуляционных) преобразователей. Сущность метода заключается в том, что при перематывании переменным магнитным полем ферромагнитного материала, являющегося основной частью первичного преобразователя, гистерезисный цикл получается симметричным, при наложении постоянного измеряемого магнитного поля напряженностью H_0 изменение состояния происходит по несимметричному циклу (рис. 5.18). В этом случае переменная составляющая магнитной

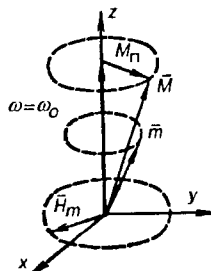


Рис. 5.17. Картина взаимодействия магнитных моментов с магнитным полем

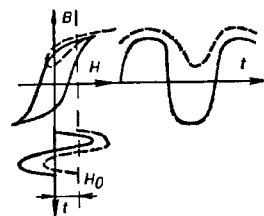


Рис. 5.18. Принцип действия феррозондового преобразователя

индукции содержит и четные гармоники. Экспериментально показано, что амплитуда второй гармоники B_{2max} на некотором интервале изменения постоянного магнитного поля линейно связана с H_0 . Таким образом, уравнение преобразования измеряемой напряженности магнитного поля в электрический сигнал имеет вид:

$$E_{2max} = f(H_0),$$

где E_{2max} — амплитуда второй гармоники ЭДС, наводимой в измерительной катушке.

Для измерения индукции и напряженности магнитного поля широко используются методы взаимодействия измеряемого магнитного поля с магнитным полем вспомогательного тока или полем постоянного магнита. В первом случае в контуре, расположенном в магнитном поле (рис. 5.19), ток I создает вращающий момент

$$M_{вр} = ISB \sin \alpha,$$

где S — площадь, охватываемая контуром; α — угол, образуемый плоскостью контура и вектором магнитной индукции B .

При создании противодействующего момента $P\alpha$, равного $M_{вр}$ (P — удельный противодействующий момент), в состоянии равновесия справедливо соотношение

$$P\alpha = ISB \sin \alpha,$$

поэтому уравнение преобразования имеет вид

$$\frac{\alpha}{\sin \alpha} = \frac{IBS}{P} = f(B).$$

На этом методе основаны магнитные весы, позволяющие с большой точностью измерять магнитную индукцию. Применится этот метод также в устройствах отбраковки постоянных магнитов.

Метод взаимодействия измеряемого магнитного поля с полем постоянного магнита нашел практическую реализацию в магнитных компасах, буссолях, теодолитах, астатических магнитометрах и других приборах, предназначенных для работы в полевых условиях.

Для измерения слабых магнитных полей иногда используют явление магнитоstriction, заключающейся в относительном изменении размеров тела под воздействием магнитного поля. Большим ограничением использования явления магнитоstriction в практике магнитных измерений является влияние на коэффициент преобразования внешних механических воздействий.

Кроме рассмотренных явлений для измерения магнитных величин могут быть использованы и другие эффекты, не получившие пока широкого распространения в практике. К ним относятся

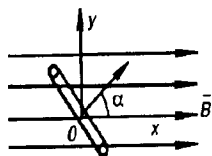


Рис. 5.19. Принцип действия механических преобразователей, основанных на взаимодействии магнитного поля и витка с током

эффекты Фарадея, Зеемана, Керра, Коттона-Мутона, Джозефсона и др. [см. разд. 2].

Методы измерения магнитных величин лежат в основе испытаний ферромагнитных материалов. Все ферромагнитные материалы делятся на магнитотвердые и магнитомягкие. Первые используются в качестве источников постоянных магнитных полей (постоянные магниты). Для них к настоящему времени сложились три направления испытаний: исследование свойств магнитотвердых материалов, производственный контроль образцов магнитотвердых материалов, производственный контроль постоянных магнитов. При исследовании свойств магнитотвердых материалов необходимо получать достаточно полную информацию о свойствах материала: начальная кривая намагничивания, предельная петля магнитного гистерезиса, кривые возврата для различных точек размагничивающего участка и др. Измерение магнитной индукции производится, как правило, с помощью индукционных и гальваномангнитных преобразователей. Измерение напряженности магнитного поля обычно сводится к измерению тока в намагничивающих устройствах или получению информации о тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля от индукционных или гальваномангнитных преобразователей. Перемагничивание магнитотвердых материалов может быть осуществлено постоянным и переменным магнитным полем [5.9 — 5.13]. При намагничивании материала постоянным магнитным полем получают статические характеристики. При непрерывном циклическом изменении магнитного поля получают динамические характеристики, которые в инфранизком диапазоне частот перемагничивания могут быть приближены к статическим с необходимой точностью.

Для обеспечения правильности процесса производства магнитотвердых материалов и соответствующей коррекции технологического режима контролируются наиболее важные отдельные параметры материала, в частности коэрцитивная сила H_c . Алгоритм получения H_c сводится к фиксации нулевых значений магнитной индукции или намагниченности и отсчету напряженности магнитного поля.

В основе классификационных признаков контроля постоянных магнитов лежит вид контролируемых параметров, способ получения информации. Различают контроль по магнитному потоку в системе, близкой к рабочей; контроль по размагничивающему участку. По способу получения выходной информации различают устройства с непосредственным отсчетом и дифференциальным способом измерения — получением информации в виде разности характеристик образцового и испытуемого магнитов.

Магнитомягкие материалы характеризуются магнитными параметрами, измеряемыми в постоянном и переменном магнитных полях. Основными измеряемыми характеристиками в постоянных магнитных полях для магнитомягких материалов являются: основная кривая намагничивания, предельная петля гистерезиса и ее параметры (B_r ,

H_c), начальная и максимальная магнитные проницаемости. ГОСТ 8.377-80 устанавливает в качестве основного баллистический метод исследования свойств материала. В настоящее время в связи с разработкой унифицированных электронных устройств широкое распространение получил метод непрерывного медленно изменяющегося магнитного поля [5.9, 5.10].

В переменных магнитных полях основными характеристиками магнитомягких материалов являются основная динамическая петля гистерезиса, комплексная магнитная проницаемость и удельные потери. Кроме того, в зависимости от частотного диапазона испытания существует еще целый ряд определяемых характеристик и параметров. Наиболее часты испытания магнитомягких материалов в частотном диапазоне 50 Гц — 10 кГц. Основными методами испытания в этом диапазоне частот являются: индукционный с использованием амперметра, вольтметра, ваттметра; индукционный с использованием компенсатора переменного тока; индукционный с использованием фазочувствительных приборов (феррометрический); индукционный с использованием феррографа (осциллографический); индукционный с использованием стробоскопических преобразователей; параметрический (мостовой).

Индукционные методы характеризуются измерением ЭДС, индуцированных в измерительных катушках. Использование амперметра и вольтметра дает возможность определения динамической относительной магнитной проницаемости. Являясь наиболее простым, этот метод измерения обладает большой погрешностью (до 10%) и не обеспечивает возможности определения потерь в образцах. Использование ваттметра стандартизировано для определения потерь в образцах из магнитомягких материалов. Преимуществами этого метода являются простота и высокая производительность, сравнительно небольшая для промышленных испытаний погрешность измерения (5—8%), широкий частотный диапазон испытания (до 10 кГц) [5.14]. К недостаткам следует отнести малый объем информации и увеличение погрешности при перемагничивании до магнитной индукции свыше 1,2 Тл из-за отклонения формы кривой от синусоидальной.

В основу феррометрического метода измерения положено определение мгновенных значений периодических несинусоидальных величин с помощью фазочувствительных приборов. Связь среднего значения производной функции и мгновенного значения самой функции является здесь основой использования инерционных приборов для регистрации динамических характеристик магнитомягких материалов:

$$E_{cp} = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} e \, dt = 4 f S W B_t,$$

где E_{cp} — среднее значение ЭДС измерительной катушки; B_t — мгновенное значение магнитной индукции.

К преимуществам феррометрического метода измерения относятся: малая погрешность (2—5%); возможность определения большого количества магнитных характеристик, в том числе и расчета потерь. Недостатками способа являются ограниченность размеров образцов и частотного диапазона; длительность процесса измерений и обработки результатов; относительно высокая стоимость устройств.

Осциллографическим методом пользуются для измерения и визуального наблюдения основной динамической кривой намагничивания, семейства симметричных петель гистерезиса, для измерения потерь в образцах на частотах от 50 до 500 Гц. К недостаткам способа следует отнести необходимость измерений на экране осциллографа, что связано с увеличением объективных и субъективных погрешностей отсчета.

Наиболее точным из индукционных методов испытания магнитомягких материалов является метод, основанный на измерении сигналов, пропорциональных B и H , с помощью компенсаторов переменного тока. Этим методом определяют зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля, составляющие комплексной магнитной проницаемости, полные потери. Достоинствами способа являются высокая точность измерения и широкий диапазон измеряемых величин. К недостаткам относятся длительность процесса измерения, высокая стоимость используемой аппаратуры и ее сложность.

Сущность стробоскопического метода измерения заключается в том, что исследуемые периодически изменяющиеся сигналы произвольной формы умножаются на так называемый строб-импульс. При этом умножение в каждом последующем периоде происходит со сдвигом во времени на некоторый интервал (шаг считывания) по отношению к предыдущему. В результате можно произвести и затем воспроизвести считывание всего периода исследуемого сигнала по точкам. Это дает возможность подобно феррометрическому методу использовать для регистрации быстроизменяющихся процессов инерционные самопишущие и цифровые печатающие приборы. Основным достоинством стробоскопического метода измерения является возможность получения документальной информации о характеристиках ферромагнитных материалов в процессе перемагничивания последних.

Параметрический метод испытания магнитных материалов заключается в определении индуктивности и сопротивления катушки с испытуемым магнитопроводом путем уравнивания мостовой цепи. В основном этот метод предназначен для определения характеристик в области слабых магнитных полей. Преимуществами его являются: высокая точность измерения, широкий частотный диапазон испытания. К недостаткам относятся: зависимость результатов измерения от имеющих место индуктивных и емкостных связей между элементами плеч моста; увеличение погрешности на низких частотах испытания; сложность и длительность процесса испытания.

Существуют и другие методы испытания магнитомягких материалов в динамическом режиме перемагничивания, однако технико-эксплуатационные характеристики устройств на их основе не эффективны в условиях массовых испытаний, поэтому здесь они не рассматриваются.

5.5. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Основными классами средств магнитных измерений являются: магнитные меры; магнитоизмерительные преобразователи; магнитоизмерительные приборы, установки и системы.

Магнитные меры разделяются на меры магнитного потока, магнитной индукции, магнитного момента. К магнитным мерам относятся также образцы магнитных материалов.

Магнитоизмерительные преобразователи, являясь основными элементами средств измерений, определяют рассматриваемые выше методы измерения магнитных величин. Различают индукционные, феррозондовые, механические, гальваномангнитные, квантовые и другие преобразователи.

Наиболее распространенным для систематизации магнитоизмерительных приборов является принцип использования физического явления в первичных преобразователях магнитных величин. Существует классификация, позволяющая объединить различного типа приборы в группы для осуществления конкретной цели: измерения параметров постоянного магнитного поля; измерения параметров переменного магнитного поля; измерения параметров неоднородного магнитного поля и т.п. Классификация приборов по такому признаку позволяет выработать единые критерии для оценки их метрологических и технико-эксплуатационных показателей. Различают и другие признаки деления приборов, для ознакомления с которыми можно рекомендовать [5.7, 5.8]. Наименование прибора, установки или системы должно отражать

название единицы измеряемой величины и функциональное назначение. Так как в приборах могут быть использованы различные магнитоизмерительные преобразователи, к наименованию прибора целесообразно добавлять наименование преобразователя. В связи с этим различают: веберметры, тесламетры (индукционные, феррозондовые, гальваномангнитные, магнитометрические, ядерные), коэрцитиметры, установки для испытания ферромагнитных материалов, устройства для контроля постоянных магнитов.

Веберметры. Веберметры представляют собой приборы для измерения магнитного потока. Широко применяются они для исследования магнитных свойств различных материалов и при измерении характеристик магнитных полей. Принцип действия их основан на явлении электромагнитной индукции.

Особенностью веберметров с измерительным механизмом в виде закрепленной на кернах или растяжках подвижной части является сползание указателя от достигнутого максимального отклонения в положение, соответствующее нулю противодействующего момента, причем по мере роста сопротивления внешней цепи скорость сползания указателя увеличивается, что приводит к погрешностям отсчета результатов измерения. Поэтому в числе паспортных характеристик веберметров приводят значения внешнего сопротивления и скорости сползания указателя. В табл. 5.16 приведены краткие технические данные некоторых веберметров. Основной тенденцией в усовершенствовании этого класса приборов является увеличение разрешающей способности, уменьшение погрешности, обеспечение не критичности к внешнему сопротивлению.

В ряде случаев приборы, основанные на индукционном способе измерения, градуируют в единицах измерения магнитной индукции. Приборы эти, носящие название индукционных тесламетров, широко применяются для измерения магнитной ин-

Т а б л и ц а 5.16. Технические данные веберметров

Наименование прибора	Пределы измерения	Внешнее сопротивление, Ом	Основная погрешность, %	Скорость сползания указателя
Милливеберметр М19	10 мВб	8—20	2,5—4,0	0,1 мВб/с
Милливеберметр М119	10 мВб	8—20—30	1,5—2,5—4,0	0,05 мВб/с
Микровеберметр М119	500 мкВб	50	1,5	2,5 мкВб/с
Микровеберметр Ф18	15—75—300 мкВб	100	4,0—2,5—1,5	0,04—0,06—0,1 мкВб/с
Микровеберметр Ф190	2—5—10—50—100—500 мкВб	100—300	2,5—1,5	0,005—0,3 мкВб/с
Микровеберметр Ф191	2—5—10—50—100—200—500—1000—2000 мкВб	—	2,5—1,0	—
Микровеберметр Ф192	50—100—200—500—1000 мкВб — 10 мВб	—	2,5—1,0	—
Микровеберметр Ф199	25—50—100—250—500—1000—2500 мкВб	100—1000	(0,05—0,03) Φ_k/Φ_x	—
Микровеберметр Ф5050	10—100—1000—10 000 мкВб	100	(0,003—0,002) Φ_k/Φ_x	—
Флюксметр М-3А/3Д (США)	1—10 000 мВб	100	1,0	1 мкВб/мин

дукции постоянных, переменных и импульсных магнитных полей, для измерения градиента напряженности неоднородного магнитного поля, намагниченности ферромагнитных материалов.

Гальваномагнитные тесламетры. Широкое распространение в практике магнитных измерений нашли приборы с гальваномагнитными преобразователями Холла. В самом простейшем варианте структурная схема тесламетра представлена на рис. 5.20, где *ПХ* — преобразователь Холла; *ИП* — источник питания; *ИЦ* — измерительная цепь; *ВП* — выходной прибор; *В* — магнитная индукция.

Для измерения параметров постоянных магнитных полей обычно *ПХ* питается от источника постоянного тока, а измерение ЭДС Холла осуществляется непосредственно с помощью показывающего прибора. Для снижения погрешности измерения магнитной индукции до 0,5–0,1 % измерение ЭДС Холла производят компенсаторами. В целях уменьшения температурной погрешности *ПХ* изготавливают из материалов со слабой зависимостью постоянной Холла от температуры (InAs, InAsP). Применяют также схемы температурной компенсации и термостатирование. Для уменьшения погрешности от нелинейности амплитудной характеристики *ПХ* используют компенсаторы с нелинейными элементами. Однако эффективность их низка, если учитывать необходимость смены преобразователей при повреждении. В целях увеличения разрешающей способности выходная часть холловского тесламетра изготавливается в цифровом варианте. Нижний предел измерения тесламетров ограничивается нестабильностью термоЭДС и напряжения неэквивалентности. Поэтому во многих разработках используют переменный ток питания *ПХ*. Верхний предел измерения тесламетров практически не ограничен. Существуют варианты увеличения чувствительности и уменьшения аддитивной составляющей погрешности с помощью схем автоматического управления током питания *ПХ*. В табл. 5.17 приведены технические данные тесламетров для измерения магнитной индукции постоянных магнитных полей.

Так как гальваномагнитные преобразователи являются малоинерционными приборами (постоянная времени 10^{-8} и 10^{-9} с), их используют в приборах для измерения переменных и импульсных магнитных полей. Для уменьшения паразитных наводок со стороны измеряемого поля *ПХ* питают переменным током, частота которого выбирается на порядок выше частоты измеряемой магнитной индукции. Наилучшая помехозащищенность достигается, если частота измеряемой магнитной индукции имеет строго фиксированное значение. Характеристики тесламетров для изме-

Т а б л и ц а 5.17. Технические данные гальваномагнитных тесламетров для постоянных магнитных полей

Наименование прибора	Пределы измерения	Класс точности, погрешность, %
Щ1-8	0,01 — 1,6 Тл	1,5
Прибор комбинированный Щ4311	Аксиальные поля 2—20 мТл; радиальные поля 2—2000 мТл	1,0/0,5
Прибор комбинированный Щ4310	2 — 200 мТл	1,5
Прибор комбинированный Ф4300	20 — 2000 мТл	1,5
Теслааперметр Ф4354/1	150, 300, 600, 1500 мТл	2,5
Миллитесламетр Ф4355	10 — 1500 мТл	2,5
Миллитесламетр Г75М	0,1 — 1000 мТл	0,5/0,3
Тесламетр 14МИ-10-0,05	1 мТл — 10 Тл	1,0/0,5
Гауссметр модели 110, 240 и 900 (США)	10^{-5} — 3 Тл	1—2,5
Измеритель магнитной индукции типа 1541 (Германия)	10^{-4} — 2 Тл	1,0
Гауссметр «Метра» (ЧСФР)	0,2 — 0,5 — 2 Тл	2,5
Гауссметр ETS-63 (Польша)	10^{-3} — 1 Тл	1 — 5

рения магнитной индукции переменных полей приведены в табл. 5.18.

Механические тесламетры. Для измерения магнитного поля Земли используются приборы с механическими преобразователями, называемые магнитометрами. Широко известны магнитные компас, теодолит, буссоль. Абсолютные магнитные теодолиты применяются для измерения малых значений магнитных индукций. При этом погрешность измерения может быть доведена до сотых долей процента. Гораздо шире используются приборы, основанные на относительных методах измерения: кварцевые и крутильные магнитометры, различного рода магнитные весы. Магнитометры с постоянными магнитами до настоящего времени занимают важное место в магнитоизмерительной технике ввиду большой чувствительности, надежности и возможности использования в полевых условиях (табл. 5.19).

Приборы с механическими преобразователями применяются и для измерения переменных магнитных полей (вариометры). Однако из-за большой инерционности первичных преобразователей частотный диапазон измеряемых величин ограничивается единицами герц. Основное применение они нашли для регистрации вариаций элементов земного магнетизма: склонения, составляющих магнитной индукции поля Земли.

Феррозондовые тесламетры. Известно большое количество феррозондовых (магнитомодуляцион-

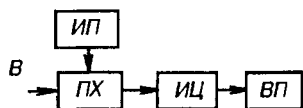


Рис. 5.20. Структурная схема тесламетра Холла

Т а б л и ц а 5.18. Технические данные некоторых гальваномагнитных тесламетров для переменных магнитных полей

Наименование прибора	Пределы измерения	Частотный диапазон	Класс точности, погрешность, %
Ф4356	0,1—100 мТл	20 Гц—20 кГц	4
Тесламетр 43205*	19,99 мТл (пост.) 100 мТл (пер.)	—	2,5 4
Гауссметр: модель 350 (США)	0,01—0,3 Тл	10 Гц—30 кГц	2
модель 750* (США)	10^{-6} —5 Тл	До 400 Гц	—
модель MG-2A (США)	10^{-3} —3 Тл	25 Гц—4 кГц	3
модель MG-3A/ЗД* (США)	10^{-4} —10 Тл	До 400 Гц	3/1
Гауссметр* MM-11 (Япония)	0,002—2 Тл	До 500 Гц	1,5

* Приборы используются для измерения магнитной индукции как переменных, так и постоянных магнитных полей.

Т а б л и ц а 5.19. Технические данные некоторых магнитометров

Наименование прибора	Пределы измерения, нТл	Цена деления, нТл	Погрешность отсчета
Магнитометр М-2	16 000	10—80	0,1—0,2 дел.
Магнитометр М-14	45 000	10	2—3 нТл
Магнитометр М-14Ф	—	1—2	0,1—0,2 дел.
Магнитометр М-18	3000 27 000 (расширенные)	10	3 нТл
Магнитометр М-27	3000 36 000 (расширенные)	10	5 нТл
Магнитометр МА-21	—	$(5—7) 10^{-2}$	0,1—0,2 дел.

ных) приборов, измеряющих магнитную индукцию или ее приращение [5.7]. Наибольшее распространение получили приборы с так называемыми дифференциальными феррозондами продольного возбуждения. На рис. 5.21 приведена схема соединения обмоток подобного типа феррозондового преобразователя. Обмотки возбуждения соединены последовательно-встречно. При отсутствии измеряемого поля H_0 ЭДС e_1 и e_2 , пропорциональные скорости изменения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 , возбуждаемых переменным полем $H_{\sim}$, равны по значению и противоположны по фазе — выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ равно нулю. В присутствии постоянного измеряемого магнитного поля перемещение материала магнитопроводов происходит по несимметричным циклам и в ЭДС появляются четные гармоники, а на выходе преобразователя получается суммарная ЭДС четных гармоник.

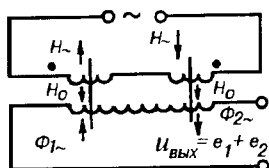


Рис. 5.21. Схема соединения обмоток феррозондового преобразователя с продольным возбуждением

Основным источником погрешности здесь является нестабильность нуля приборов, обусловленная наличием гистерезиса и магнитной вязкости при перемагничивании материала магнитопроводов. В табл. 5.20 приведены технические данные некоторых феррозондовых тесламетров отечественного и зарубежного производства для измерения магнитной индукции постоянных полей.

Тесламетры на основе ядерного магнитного резонанса. Наибольшей точностью измерения параметров постоянных магнитных полей обладают приборы на основе ядерного магнитного резонанса. В геофизической практике широкое применение нашли серийно выпускаемые магнитометры ПМ-1, ПМ-5, ПМ-20. Аналогичные разработки имеются и за рубежом [5.15]. Магнитометры на основе ядерного магнитного резонанса используются как измерители сильных магнитных полей, а также в качестве образцовых при поверке тесламетров более низкого класса точности. В табл. 5.21 приведены технические данные магнитометров на основе ядерного магнитного резонанса.

Устройства для испытания магнитотвердых материалов. Устройства для испытания магнитотвердых материалов при импульсном изменении внешнего магнитного поля являются классическими и имеют наиболее высокие точностные показатели.

Этим объясняется применение их в метрологической службе и при точных лабораторных измере-

Т а б л и ц а 5.20. Технические данные некоторых феррозондовых тесламетров

Наименование прибора	Пределы измерения	Порог чувствительности, погрешность	Смещение нуля
Аэромагнитометр АМ-13	11 000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Аэромагнитометр АСГ-46	6000 нТл	4 нТл	5 нТл/ч
Магнитометр М-17	50—250—1000—3000—6000 нТл	1 %	5 нТл/ч
Прибор Г71	5—10—20 кА/м	1,5 %	6 А/м
Прибор Г79	0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30; 100; 300; 1000 мкТл	5 %	—
Магнитометр 1964 (Финляндия)	2,5—7,5—25—75—250 мкТл	10 нТл	—
Магнитометр MF-1-100 (Канада)	0,1—0,3—1—3—10—30—100 мкТл	0,5 нТл	—

Т а б л и ц а 5.21. Технические характеристики магнитометров на основе ядерного магнитного резонанса

Наименование прибора	Пределы измерения	Погрешность, %
Протонный магнитометр ПМ-1	35 000—55 000 нТл	0,001
Протонный магнитометр ПМ-5	40 000—65 000 нТл	0,003
Магнитометр М-20	35 000—70 000 нТл	0,005—0,01
Тесламетры: Ш1-1 (ИМИ-2)	0,025—2,5 Тл	0,01—0,1
Ш1-9	0,025—2,5 Тл	0,01—0,1
ИМП-3	0,05—2,75 Тл	0,004—0,3
Магнитометр ЯМ-1	$5 \cdot 10^{-2}$ —2,5 Тл	0,01
Магнитометр М-49	19 000— 100 000 нТл	—
Протонный магнитометр (Англия)	24 000—70 000 нТл	0,002
Протонный магнитометр (Япония)	30 000—58 000 нТл	—
Аэромагнитометр МР-121 (Франция)	30 000—75 000 нТл	—
Магнитометр G502 (США)	0,0305—8,5 Тл	0,001

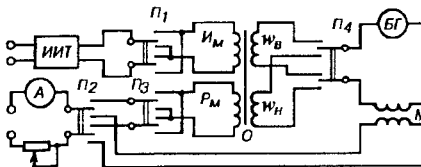


Рис. 5.22. Схема устройства для испытания магнитотвердых материалов при импульсном намагничивании:

ИИТ — источник импульсного тока; I_M — импульсная намагничивающая катушка; P_M — размагничивающая катушка; W_B — измерительная катушка магнитной индукции; W_H — измерительная катушка напряженности магнитного поля; A — амперметр; M — катушка взаимной индуктивности; $БГ$ — баллистический гальванометр; P_1 — P_4 — переключатели; O — испытуемый образец

ниях. Структурная схема установки, рекомендуемой ГОСТ 8.268-77 для исследования образцов магнитотвердых материалов, приведена на рис. 5.22. Особенностью установки является наличие импульсного источника тока для намагничивания испытуемого материала до насыщения и размагничивание его с использованием источника постоянного тока. Наиболее совершенной разработкой рассматриваемого класса устройств является измерительная информационная система У5056. Эта система обеспечивает измерение B и H в любой точке кривой размагничивания при импульсном намагничивании и размагничивании плавно изменяющимся магнитным полем. Значение отсчитываемых параметров производится с помощью цифровых гистерезисметров Ф5155/1,2.

Погрешность измерения H_c и B_r не превышает 3%. Время измерения одной точки зависимости $B(H)$ менее 30 с.

В настоящее время разработаны устройства с циклическим изменением внешнего перемагничивающего поля и непрерывным измерением магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

В табл. 5.22 приведены технические данные ряда устройств для испытания магнитотвердых материалов отечественного и зарубежного производства.

Одним из параметров, характеризующих качество образцов магнитотвердых материалов, является коэрцитивная сила H_c . В зависимости от типа первичного преобразователя, фиксирующего равенство нулю магнитной индукции или намагниченности материала, различают коэрцитиметры с индукционными, феррозондовыми и гальваноманитными преобразователями. С техническими данными некоторых коэрцитиметров можно ознакомиться по табл. 5.23.

Особенностью устройств для контроля постоянных магнитов является обеспечение высокой производительности. Контролируемыми, как правило, являются размагничивающий участок петли магнитного гистерезиса или отдельная точка (B_p , H_p), характеризующая состояние магнита, близкое к рабочим условиям.

Устройства для испытания магнитомягких материалов. Для испытания магнитомягких материалов в постоянных магнитных полях ГОСТ 8.377-80

Т а б л и ц а 5.22. Технические данные некоторых устройств для испытания магнитотвердых материалов

Тип устройства	Длина образцов, мм	Значения напряженности поля, кА/м	Погрешность, %
У-541	20—60	$H_c = 10 \div 120$	3
УПМ-68	40—60	$H_c = 250$	3
У-5056	4—100	$H_m = 450$	3
ВНН-50 (Япония)	10	$H_m = 1600$	—
МН-10 (США)	2	$H_m = 1680$	1
МН-30 (США)	6,4	$H_m = 2800$	1
МН-40 (США)	6,5	$H_m = 2800$	1
МН-50 (США)	6,4	$H_m = 2800$	1

Т а б л и ц а 5.23. Технические данные некоторых коэрцитиметров

Тип коэрцитиметра	Значения H_c , кА/м, не более	Погрешность, %
У5030	400	4
КИФМ-1	50	3
ИКС-95	60	1—2
К400	400	2—3
1.095 (Германия)	100	2
МС-10D (США)	300	1

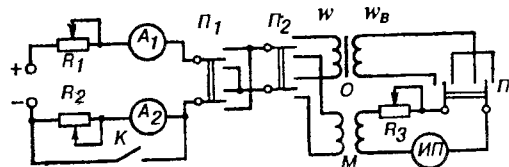


Рис. 5.23. Устройство для определения статических характеристик магнитотяжких материалов:

R_1, R_2 — регулировочные реостаты; A_1, A_2 — амперметры; K — ключ; $P_1—P_3$ — двухполюсные переключатели; w — намагничивающая обмотка; w_B — измерительная обмотка магнитной индукции M — катушка взаимной индуктивности; R_3 — магазин резисторов; ИП — измерительный прибор; O — испытуемый образец

рекомендует использовать измерительную информационную систему У5045, принципиальная схема которой приведена на рис. 5.23. Средства измерения, входящие в установку, должны иметь класс точности не ниже 0,2; образцовая катушка взаимной индуктивности должна быть мерой 2-го разряда. В качестве измерителя магнитной индукции используется микровеберметр Ф 191 или Ф 5050. В качестве образцовой катушки взаимной индуктивности используется катушка Р5009, имеющая взаимную индуктивность $M = 0,001$ и $0,01$ Гн. Измерителем тока служат приборы М1104 (0,75—

750 мА; 1,5—30 А) класса точности 0,2 и М17, имеющие внешнее критическое сопротивление 40—250 Ом, период собственных колебаний 18—20 с.

Для определения магнитных характеристик электротехнических сталей на соответствие стандарту серийно выпускается комплексное устройство У5033. Измерения производятся на образцах массой 1 и 10 кг. Для испытания магнитотяжких материалов в переменных магнитных полях широко распространены устройства, использующие индукционный метод измерения с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Схема реализации этого метода приведена на рис. 5.24. Метод нашел отражение в отечественных установках У5018, У5010, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5011, У5034, У5021П, У5021ПМ, У5013. Установки У5018 и У5010 используют одновременно методы амперметра-вольтметра, мостовой и осциллографический. Максимальные значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля определяются по первым гармоникам указанных величин. Установка У5011 менее точна и универсальна, но обладает простой методикой измерения. Особенностью установок УМИПТ-1 и УМИПТ-2 является возможность измерения средней напряженности магнитного поля и мгновенного значения ее. Установки У5033 и У5034 имеют более высокую точность и степень автоматизации процесса испытаний. В установке У5021 параметры материала фиксируются на ленте цифрпечатающего механизма. Контроль параметров холоднокатаной рулонной стали в процессе непрерывного отжига обеспечивает установка У5013. Здесь предусмотрено документальная запись результатов измерения автоматическим компенсатором и световая сигнализация отклонения B и P от допустимых значений.

Схема реализации феррометрического способа измерения динамических параметров магнитотяжких материалов иллюстрируется рис. 5.25. Этот способ измерения лежит в основе установок У542, Ф-2М, Ф-3, Ф5063. Установка У542 измеряет широкий спектр магнитных характеристик, но только на частоте 50 Гц. Хорошей устойчивостью работы и независимостью погрешностей в широком диапазоне частот обладает феррометр Ф-3. Широко распространен в практике магнитных измерений векторметр И50, позволяющий снимать динамический цикл перемагничивания с фиксацией B_{max} и H_{max} . Цифровой феррометр Ф5063 снабжен циф-

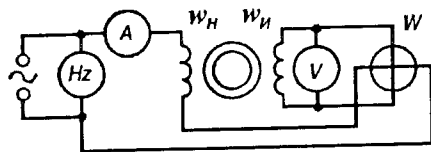


Рис. 5.24. Схема измерения динамических характеристик методом амперметра, вольтметра, ваттметра: А — амперметр; V — вольтметр; W — ваттметр; w_H и w_B — измерительная и намагничивающая катушки

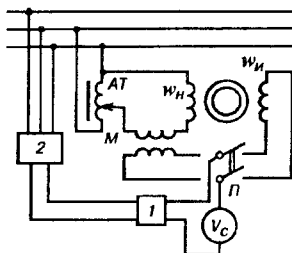


Рис. 5.25. Схема феррометра:

1 — управляемый выпрямитель; 2 — фазовращатель; АТ — автотрансформатор; М — катушка взаимной индуктивности; w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; V_с — вольтметр средних значений; П — переключатель

ропечатающим устройством; имеется возможность представления информации в графическом виде.

Наибольшей точностью обладают компенсаторы переменного тока. Отечественной промышленностью выпускаются установки У55 и У5015. В установке У55 используется прямоугольно-координатный компенсатор. Измерение средних значений ЭДС осуществляется с помощью фазочувствительных приборов. Установка У5015 работает в широком частотном диапазоне (50–8000 Гц).

Схемы рис. 5.26 и 5.27 иллюстрируют реализацию феррографического и мостового методов измерения [5.14]. В нашей стране выпускается устройство с двухлучевым осциллографом ДЭСО-1, являющееся составной частью установок У5010, У5018.

Принцип работы и основные технические характеристики установок У520, У55, У542, УМИПТ-1, УМИПТ-2, У5010, У5011, У5017, У5018, ДСШУ-М, У5015, Ф-2М, Ф-3 освещены в [5.14]. В табл. 5.24 приведены технические данные

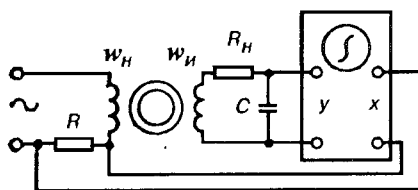


Рис. 5.26. Схема феррографа:

w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; R_н и C — интегрирующая цепь; R — образцовый резистор

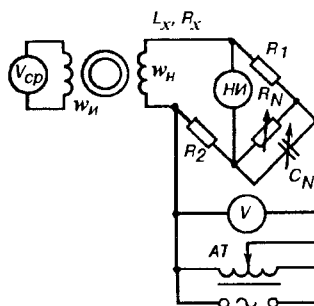


Рис. 5.27. Схема установки для испытания магнитомягких материалов мостовым методом:

АТ — автотрансформатор; R_х и L_х — измеряемые сопротивление и индуктивность; C_н и R_н — уравнивающие конденсатор и резистор; R₁ и R₂ — резисторы; w_н и w_и — намагничивающая и измерительная катушки; НИ — нуль-индикатор; V и V_{ср} — вольтметры действующего и среднего значения

некоторых разработанных в последние годы устройств для испытания магнитомягких материалов отечественного и зарубежного производства.

Т а б л и ц а 5.24. Технические данные некоторых установок для испытания магнитомягких материалов

Тип установки	Частотный диапазон, Гц	Контролируемые параметры и характеристики	Пределы измерения	Погрешность измерения
У5045	0	$B(H)$, B_r , H_c	0,01; 0,1; 1; 10 Тл; 0,75 мА; 0,75; 15 А для измерения H	$\gamma_B = \gamma_H = 3\%$
УМТ-85-2	0	$B(H)$ и ее параметры	0,01; 0,1; 1; 10 мВ для измерения B ; 1 ÷ 5 А для измерения H	—
МАГ-3	50—50 000	$B(H)$ и ее параметры, удельные потери P	0,05—5 В для измерения B ; 2; 20; 200; 2000 мА для измерения H	$\gamma_B = \gamma_H = 1\%$ $\gamma_P = 1,5\%$
У5033	50—400	B_{max} (H_{max}), P	В соответствии с ГОСТ 21427.1-83	$\gamma_B = \gamma_H = \gamma_P = 2 \div 5\%$
У5063	25—10 000	$B(H)$, B_r , H_c	0,01; 0,1; 1; 10 В для измерения B ; 0,01; 0,1; 1; 10 А для измерения H	$\gamma_B = 0,5\% + 1$ ед. счета $\gamma_H = 1\% + 1$ ед. счета
МН-20 (США)	0,01—10 000	$B(H)$ и ее параметры	24 000 А/м	$\gamma_B = 1\%$ $\gamma_H = 0,5\%$
SRB-326 (Япония)	50—10 000	$B(H)$ и ее параметры, P	800 А/м	$\gamma_B = \gamma_H = 3\%$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5.1. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/ Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1987.

5.2. Электрические измерения: Учеб. пособие для вузов / Р.М. Демидова-Панферова, Ю.Н. Евланов, В.Н. Малиновский и др.; Под ред. В.Н. Малиновского М.: Энергоатомиздат, 1985.

5.3. Метрология и электроизмерительная техника: Учеб. пособие / В.И. Диденко, И.Н. Желбаков, В.Ю. Кончаловский и др.; Под ред. В.Н. Малиновского. М.: МЭИ, 1981.

5.4. Основополагающие стандарты в области метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1986.

5.5. Основные термины в области метрологии: Словарь-справочник / М.Ф. Юдин, М.Н. Селиванов, О.Ф. Тищенко и др.; Под ред. Ю.В. Тарбеева. М.: Изд-во стандартов, 1989.

5.6. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы. Раздел 6. Основы метрологии. Измерение электрических и магнитных величин / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. — 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.

5.7. Средства измерения параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев и др. Л.: Энергия, 1979.

5.8. Методы ядерного магнитного резонанса/ Н.Н. Шумиловский, А.Л. Скрипко, В.С. Король и др. Л.: Энергия, 1966.

5.9. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки. М.: Энергоиздат, 1982.

5.10. 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.

5.11. Антонов В.Г., Петров Л.М., Щелкин А.П. Средства измерений магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

5.12. Гальваномагнитные преобразователи в измерительной технике/ В.В. Брайко, И.П. Гринберг, Д.В. Ковальчук и др.; Под ред. С.Г. Таранова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

5.13. Ягола Г.К., Спиридонов Р.В. Измерение

магнитных характеристик современных магнитотвердых материалов. М.: Изд-во стандартов, 1989.

5.14. Автоматический контроль магнитных материалов/ Ю.В. Селезнев, Ю.Н. Маслов, Г.Н. Рыжков и др. М.: Высшая школа, 1971.

5.15. Проспекты фирмы «Walker», 1970.

5.16. Постоянные магниты: Справочник/ Под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980.

5.17. Нестерни В.А. Оборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Государственные стандарты

ГОСТ 20906-75. Средства измерения магнитных величин. Термины и определения.

ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.

ГОСТ 8.268-77. Материалы магнитотвердые лите. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов.

ГОСТ 8.095-81. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции от 5×10^{-12} до $5 \cdot 10^{-2}$ Тл в диапазоне частот 0—0,1 Гц.

ГОСТ 8.144-75. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции в диапазоне 0,05—2 Тл.

ГОСТ 8.188-85. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 2—10 Тл при температуре 4,2—300 К и в диапазоне 0,1—2 Тл при температуре 4,2—77 К.

ГОСТ 8.093-80. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции от 10^{-13} до 1 Тл в диапазоне частот от 0,1 до 20 000 Гц.

Методические указания

МИ 1317-86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешностей измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

Р а з д е л 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

С О Д Е Р Ж А Н И Е

6.1. Основные положения теории подобия и моделирования. Особенности задач электротехники и электроэнергетики	127	ний в электроэнергетических установках	133
6.2. Теоремы и дополнительные положения о подобии и моделировании	128	6.5. Организация эксперимента и обработка его результатов в критериальной форме	136
Первая теорема (128). Вторая теорема (π -теорема) (129). Третья теорема (129). Дополнительные положения о подобии (130)		6.6. Реализация физического подобия и моделирования	137
6.3. Три способа определения критериев подобия	131	6.7. Реализация аналогового подобия и моделирования	138
6.4. Две задачи определения критериев подобия электромагнитных и других явлений в электроэнергетических установках		6.8. Реализация математического цифрового подобия и моделирования	139
		6.9. Требования к точности и достоверности результатов моделирования	140
		Список литературы	141

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Содержание теории подобия — это изучение свойств подобных явлений и методов установления подобия. Введем ряд терминов и их определений, которые будут использоваться в этом разделе.

Явление — совокупность процессов, т.е. изменений, происходящих в системе.

Режим — состояние системы, определяющееся множеством различных процессов. Режим может быть установившимся или переходным.

Параметры режима — показатели состояния (например, для электрической системы — значения мощности, напряжения, тока, частоты, угла сдвига фаз и т.д.).

Параметры системы — показатели, определяющиеся физическими свойствами элементов системы, схемой их соединений и допущениями расчетного характера. К параметрам электрической системы относятся значения полных, активных и реактивных сопротивлений, коэффициентов трансформации, постоянных времени, коэффициентов усиления и т.д. Например, ток в ветви $I=U/R$, где ток I и напряжение U — параметры режима, сопротивление R — параметр системы.

Системы, у которых параметры неизменны в течение всего изучаемого процесса или изменяются независимо от его протекания, называются соответственно *линейными системами* или *системами с переменными параметрами*. Системы, у которых хотя бы один параметр системы изменяется в функции одного или нескольких параметров режима, называются *нелинейными*.

Подобие процессов требует соответствия сходственных величин: геометрических размеров, параметров системы и параметров режима. Простейший случай этого соответствия — пропорциональность.

Соотношение подобия имеет вид: $P_i/R_i = m_i$, где P_i , R_i — сходственные параметры процессов и элементов рассматриваемых систем; m_i — коэффициент подобия, или масштаб сходственных параметров. *Геометрическое подобие* означает, что все пространственные координаты подобных систем пропорциональны. Математически это условие в декартовых координатах записывается следующим образом:

$$x_i/X_i = m_x, y_i/Y_i = m_y, z_i/Z_i = m_z,$$

где $m_x = m_y = m_z$; x_i , y_i , z_i , X_i , Y_i , Z_i — координаты сходственных точек рассматриваемых систем. При неравенстве масштабов по координатным осям, т.е. $m_x \neq m_y \neq m_z$, осуществляется так называемое *аффинное подобие*.

Полное тождество явлений в пространстве и во времени, получаемое после изменения масштаба, свойственно *абсолютному подобию*, которое представляет собой абстрактное понятие. При изучении физических явлений и решении технических задач исследователь не имеет дело со сходством во всех деталях, пользуясь следующими понятиями [6.1].

Полное подобие — подобие протекания во времени и в пространстве основных процессов, т.е. тех процессов, которые достаточно полно (в целях данного исследования) определяют изучаемое явление.

Например, можно считать, что у синхронных генераторов электромеханические явления имеют полное подобие, если все процессы изменения во времени токов, напряжений, вращающих моментов и изменения во времени и в пространстве распределения магнитных и электрических полей отличаются только масштабами. При этом, однако, шумы, нагрев или механическое напряжение отдельных деталей могут быть неподобными, так как они заведомо не оказывают существенного влияния на подобие подлежащих исследованию электромеханических явлений.

Неполное подобие — подобие протекания процессов только во времени или только в пространстве.

Так, электромеханические процессы в синхронных генераторах могут быть подобны во времени, но пространственное (геометрическое) подобие полей внутри машины может при этом отсутствовать. Это не искажает подобия переходных и установившихся режимов в электрической системе.

Приближенное подобие (полное или неполное) характеризуется упрощающими допущениями, заведомо приводящими к искажениям, заранее оцениваемым как допустимые на основании дополнительных аналитических или экспериментальных исследований.

Примером приближенного подобия является нахождение условий подобия генераторов на основании упрощенных уравнений, не учитывающих апериодическую составляющую тока статора и периодическую составляющую тока ротора.

Исходя из физической природы подобных явлений, различают:

физическое подобие, при котором подобные явления имеют одинаковую физическую природу (так, механическим процессам в одной системе обязательно соответствуют механические процессы в подобных ей системах, электрическим процессам — электрические и т. д.);

математическое (аналоговое или цифровое) *подобие*, при котором подобные явления имеют различную физическую природу; аналогия в данном случае основывается на одинаковой форме (изоморфизме) уравнений, описывающих явления (например, уравнение механического процесса колебаний маятника по форме аналогично уравнению процесса электрических колебаний тока и напряжения в цепи, содержащей конденсатор и индуктивную катушку).

В электротехнике и электроэнергетике часто применяется *моделирование* — исследование промежуточного объекта (модели), базирующееся на его подобии изучаемому объекту (оригиналу). *Моделью* называют любой объект (явление, процесс, установку), находящийся в отношении подобия к моделируемому объекту.

В моделирование входит построение модели, изучение ее и перенос полученных сведений на моделируемый объект.

В электротехнических и электроэнергетических задачах имеются особенности применения методов теории подобия и моделирования:

1) к подобию электрических и электромеханических явлений можно подходить или как к подобию цепей (неполное подобие), или как к подобию полей (полное подобие); при подобии цепей геометрическое подобие может не соблюдаться. Например, подобными могут быть две электрические цепи, содержащие элементы с сосредоточенными параметрами, если схемы включения этих элементов одинаковы. Требование пространственного подобия выражается здесь в требовании одинаковой конфигурации электрических схем;

2) явления, происходящие в электрических системах или установках, могут быть связаны с

тепловыми, механическими и другими процессами, подобие которых должно устанавливаться одновременно с электромагнитным подобием;

3) при моделировании сложных электроэнергетических систем приходится учитывать, что система в целом обладает качествами, не свойственными образующим ее элементам. Отдельные элементы и подсистемы, взаимодействуя, создают глубокие внутренние связи, которые не позволяют без специальных приемов расчленять систему на независимые составляющие, применяя метод наложения.

В ряде случаев приходится учитывать также нелинейность характеристик, неоднородность и анизотропию систем, влияние стохастических факторов на протекание моделируемых процессов.

6.2. ТЕОРЕМЫ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ПОДОБИИ И МОДЕЛИРОВАНИИ

ПЕРВАЯ ТЕОРЕМА

Явления, подобные в том или ином смысле (физически, математически и т. д.), имеют некоторые одинаковые сочетания параметров, называемые критериями подобия.

Краткая формулировка первой теоремы: у всех подобных явлений $\pi = \text{idem}$, где idem означает: соответственно одинаково для всех рассматриваемых процессов.

Критерии¹ подобия любого явления могут преобразовываться в критерии другой формы, получаемые за счет операций умножения или деления критериев, возведения их в степень или умножения на любой постоянный коэффициент k . В самом деле, если какие-либо значения $\pi_k = \text{idem}$, $\pi_{k+j} = \text{idem}$ являются критериями, то в соответствии с определением подобия $\pi_k \pi_{k+j} = \text{idem}$; $\pi_k / \pi_{k+j} = \text{idem}$; $1/\pi_k = \text{idem}$; $k\pi_k = \text{idem}$.

Пусть в цепи, обладающей сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 , при включении ее на постоянное напряжение U_1 протекает процесс, описываемый уравнением

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt_1}.$$

Во второй цепи с параметрами R_2 , L_2 протекает подобный первому процесс, уравнение которого

$$U_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt_2}.$$

Разделим эти уравнения соответственно на $i_1 R_1$ и $i_2 R_2$:

$$1 - \frac{U_1}{i_1 R_1} + \frac{L_1}{i_1 R_1} \frac{di_1}{dt_1} = 0;$$

$$1 - \frac{U_2}{i_2 R_2} + \frac{L_2}{i_2 R_2} \frac{di_2}{dt_2} = 0.$$

¹ Принятый в электротехнических и электроэнергетических задачах термин «критерий подобия» обычно обозначается π . В теплотехнических и гидромеханических задачах наиболее часто применяется термин «число подобия» (например, число Рейнольдса, число Маха и т. д.).

Так как процессы подобны, то

$$U_1 = m_U U_2; i_1 = m_i i_2; \\ R_1 = m_R R_2; L_1 = m_L L_2; t_1 = m_t t_2.$$

Сделав подстановку последних выражений в уравнение первого процесса, будем иметь

$$1 - \frac{m_U}{m_i m_R} \frac{U_2}{i_2 R_2} + \\ + \frac{m_L m_i}{m_i m_R m_t} \frac{L_2}{i_2 R_2} \frac{di_2}{dt_2} = 0.$$

Сопоставление полученного уравнения с уравнением второго процесса дает

$$\frac{m_U}{m_i m_R} = \frac{m_L}{m_R m_t} = 1.$$

Заменяя масштабы отношениями сходственных параметров, получаем:

$$\frac{U_1/U_2}{(i_1/i_2)(R_1/R_2)} = 1; \frac{L_1/L_2}{(R_1/R_2)(t_1/t_2)} = 1$$

или

$$\pi_1 = \frac{U_1}{i_1 R_1} = \frac{U_2}{i_2 R_2}; \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t_1} = \frac{L_2}{R_2 t_2}.$$

Отношения членов уравнения π_1 и π_2 представляют собой безразмерные комбинации параметров (безразмерные комплексы), численно одинаковые для всех подобных процессов, т. е. критерии подобия.

В рассмотренном примере все члены уравнений — однородные функции; это дало возможность вынести масштабы $m_U, m_i, \dots$ в соответствующих степенях за знак функции в виде общего множителя. Если уравнения содержат неоднородные функции (трансцендентные, сложные и т. д.), то аналогичное преобразование невозможно. Если при этом подобие процессов существует, то аргументы неоднородных функций должны быть равны, являясь также критериями подобия.

Например, для $\varphi_j = K \sin axu$ и $\Phi_j = K \sin AXU$ подобие процессов требует равенства $axu = AXU = \text{idem}$.

Если в аргумент неоднородной функции входит сумма, например $a_+ x_+ y$ или $A+X+Y$, то все слагаемые должны быть соответственно одинаковы.

ВТОРАЯ ТЕОРЕМА (π -теорема)

Всякое полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено зависимостью между критериями подобия, т. е. уравнением, связывающим безразмерные величины, полученные из участвующих в процессе параметров. Связи между параметрами режима и параметрами системы можно представить уравнением

$$f(P_1, P_2, \dots, P_r, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m) = 0.$$

Если это уравнение учитывает все связи между входящими в него величинами, т. е. является полной зависимостью, то оно не может изменяться при любом изменении единиц измерения физиче-

ских величин. Любое неполное уравнение становится полным, если рассматривать коэффициент пропорциональности как величину, имеющую размерность и изменяющуюся при изменении единиц измерения [6.1].

Между единицами величин $P_1, P_2, \dots, P_m$, входящих в полное уравнение, существует определенная связь. Например, выбрав единицы тока и напряжения, уже нельзя произвольно выбрать единицу, измеряющую сопротивление или мощность. Анализ размерностей показывает, что только k единиц величин $P_1, \dots, P_m$ являются независимыми, а остальные $m-k$ единиц являются их степенными функциями.

π -теорема на основе теории размерностей позволяет произвести замену переменных, сократив их число с m размерных величин до $m-k$ безразмерных величин, и тем самым перейти к записи уравнения процесса в критериальной форме:

$$f(1, 1, \dots, 1, \pi_1, \dots, \pi_{s-k}, \dots, \pi_{m-k}) = 0,$$

где $\pi_1, \dots, \pi_{m-k}$ — критерии подобия,

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{x_{k+1}} P_2^{y_{k+1}} \dots P_k^{z_{k+1}}}, \dots \\ \dots, \pi_{s-k} = \frac{P_s}{P_1^{x_s} P_2^{y_s} \dots P_k^{z_s}}, \dots \\ \dots, \pi_{m-k} = \frac{P_m}{P_1^{x_m} P_2^{y_m} \dots P_k^{z_m}}.$$

При этом упрощается обработка результатов исследований, так как связи между безразмерными критериями подобия π , как правило, выявляются проще, чем связи между обычными именованными величинами.

Существенно, что согласно π -теореме переход к безразмерным соотношениям (связывающим критерии) позволяет распространять результаты конкретного аналитического и экспериментального исследования на ряд подобных явлений. При этом можно находить безразмерные соотношения, не имея математического описания процесса в виде уравнения, а зная только все участвующие в процессе величины и их размерности.

Записанное в критериальной форме уравнение, разрешенное относительно какого-либо критерия подобия (например, π_1), позволяет выразить его как функцию $m-k-1$ критериев подобия:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{m-k}).$$

Для того чтобы убедиться в справедливости π -теоремы, обратимся к рассмотренному выше примеру. Существующую связь между параметрами режима i, U, t и параметрами системы R, L можно представить в виде

$$i = f(t, U, R, L).$$

π -теорема дает возможность на основе анализа размерностей параметров определить критерии подобия¹ и представить записанное в общем виде

¹ Процедура определения критериев подобия на основе анализа размерностей (π -теорема) будет рассмотрена в следующем параграфе.

полное уравнение процесса зависимостью между критериями подобия

$$\pi_1 = \frac{U}{iR} = \Phi(\pi_2) = \Phi\left(\frac{L}{Rt}\right)$$

Для данного примера известно решение исходного дифференциального уравнения процесса

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right).$$

Преобразовав это выражение, получим

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2) = \frac{1}{1 - e^{-(1/\pi_2)}}$$

Последнее уравнение свидетельствует о том, что предсказанная с помощью π -теоремы функциональная связь между критериями подобия действительно существует и раскрывает вид этой связи.

ТРЕТЬЯ ТЕОРЕМА

Эта теорема, формулируя условия, необходимые и достаточные для практической реализации подобия, утверждает: для подобия явлений должны быть соответственно одинаковыми определяющие критерии подобия и подобными условия однозначности.

Определяющие критерии содержат те параметры режима и параметры системы, которые в данной задаче можно считать независимыми (время, длина и т. д.). Условия однозначности определяют индивидуальные особенности процесса, выделяя из многообразия процессов данного класса конкретный. К ним относятся факторы и условия, не зависящие от механизма самого явления:

- а) геометрические свойства системы, в которой протекает процесс;
- б) физические параметры среды и тел, образующих систему;
- в) начальное состояние системы (начальные условия);
- г) условия на границах системы (граничные или краевые условия);
- д) взаимодействие объекта и внешней среды.

При анализе переходных процессов к условиям однозначности следует отнести также параметры режима, которые в данной задаче можно полагать неизменяющимися.

В каждом конкретном случае условия однозначности могут быть различны в зависимости от рода решаемой задачи и вида уравнения. Так, для выделения определенного процесса из совокупности процессов, описываемых уравнением

$$iR + L \frac{di}{dt} = U = \text{const},$$

достаточно задать значения параметров системы R , L , значение неизменяющегося параметра режима U и начальные условия: $i = i_0$ при $t = t_0$. В задачах, связанных с полным подобием, однозначность процессов определяется не только начальными условиями, но и свойствами среды, геометрическими размерами системы и граничными условиями.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ПОДОБИИ

I. *О подобии сложных систем.* Подобие сложных систем, состоящих из нескольких подсистем, соответственно подобных в отдельности, обеспечивается подобием всех сходственных элементов, являющихся общими для подсистем. Общая часть подсистем может при этом рассматриваться как самостоятельная система, количество критериев подобия которой может определяться согласно π -теореме, а условия создания подобия — согласно третьей теореме.

Из приведенной формулировки следует, что если к какой-либо системе-модели присоединить натуральные регуляторы, защитные и измерительные приборы и другую аппаратуру, то система-модель, включающая эти устройства, будет подобна системе-оригиналу при сохранении подобными условий их присоединения.

II. *О подобии нелинейных систем.* Все теоремы и условия подобия могут быть распространены на нелинейные системы или системы с переменными параметрами, если выполняются условия совпадения относительных характеристик сходственных параметров, являющихся нелинейными или переменными.

Относительная характеристика, пример которой показан на рис. 6.1, имеет вид $P_{н*} = \varphi_{0*}(P_{i*})$, где величины со звездочкой — относительные значения, выраженные в долях некоторого характерного — базисного — параметра P_6 .

III. *О подобии анизотропных или неоднородных систем.* Условия подобия, справедливые для изотропных систем, которые характеризуются одинаковостью физических свойств (удельная электрическая проводимость, теплопроводность, упругость и т. п.) по всем координатам (x, y, z) внутри данной системы, могут быть распространены и на анизотропные системы, имеющие неоднородности.

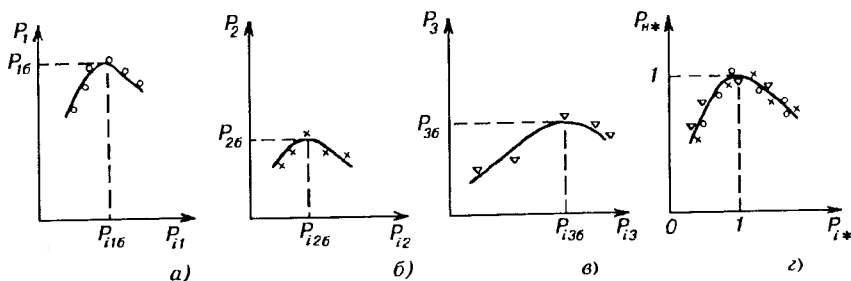


Рис. 6.1. Подобие трех (а, б, в) нелинейных зависимостей при выражении их через базисный параметр и представлении на обобщенной (г) характеристике $P_{н*} = \varphi_{0*}(P_{i*})$; $P_{н*} = P/P_6$, $P_{i*} = P_i/P_6$

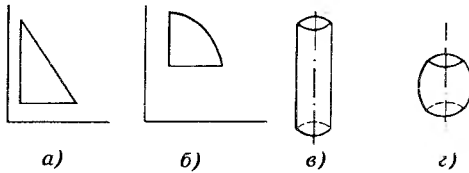


Рис. 6.2. Примеры нелинейного подобия:

a — геометрическая фигура (треугольник); *б* — нелинейно подобный деформированный треугольник; *в* — цилиндр; *г* — нелинейно подобное цилиндру тело

наковые свойства по различным направлениям. При этом относительные анизотропии в сравниваемых системах должны быть соответственно одинаковы. Условия подобия, справедливые для однородных систем, могут быть распространены и на неоднородные в том или ином смысле системы, если только относительная неоднородность в сравниваемых системах соответственно одинакова.

Подход к установлению условий подобия систем, обладающих неоднородностью или анизотропией, остается в любом случае таким же, как и подход к нелинейным системам.

IV. *О подобии физических явлений при отсутствии геометрического подобия.* В системах, геометрически не подобных, но имеющих нелинейное подобие пространства (подобных, например, аффинно), процессы могут быть физически подобны, имея в сходственных точках пространства подобные изменения параметров процесса.

Примеры нелинейного пространственного подобия приведены на рис. 6.2.

V. *Об условиях подобия при вероятностном характере изучаемых явлений.* Все теоремы и условия подобия, относящиеся к детерминированно заданным системам, справедливы и для стохастически определенных систем при условии совпадения у этих систем плотностей вероятностей сходственных параметров, представленных в виде относительных характеристик. При этом дисперсии и математические ожидания всех параметров (с учетом масштабов) должны быть у подобных систем одинаковыми.

6.3. ТРИ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

1. *Определение критериев подобия путем приведения уравнения к безразмерному виду (способ интегральных аналогов).* Уравнение после деления на любой из n его членов приводится к безразмерному виду. Опуская в полученных безразмерных членах уравнения символы дифференцирования и интегрирования, а также исключая из записи имеющиеся неоднородные функции (трансцендентные, сложные и т. д.), можно полученные таким образом выражения считать критериями подобия (см. первую теорему подобия).

К полученным в результате операции деления $n-1$ основным критериям необходимо присовокупить a дополнительных критериев — аргументов, входящих в члены уравнения неоднородных функций. Общее количество критериев k , найденных способом интегральных аналогов, $k = (n-1) + a$.

Пример. Рассмотрим определение критериев подобия для процесса, происходящего при включении неразветвленной цепи, содержащей сосредоточенные параметры R , L и C , на источник переменного напряжения с амплитудой U и угловой частотой ω . Процесс характеризуется уравнением

$$U \sin \omega t = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + iR.$$

Разделив все члены уравнения на четвертый член, получим одну из возможных форм записи трех основных критериев подобия:

$$\pi_1 = U/iR, \pi_2 = L/Rt, \pi_3 = t/RC,$$

а также дополнительный критерий — критерий гомохронности

$$\pi_4 = \pi_{Ho} = \omega t.$$

Последний критерий имеет смысл только при условии, что воспроизводится изменение напряжения источника именно по синусоидальному закону.

2. *Определение критериев подобия на основе анализа размерностей (π-теоремы).* Связи между параметрами режима и параметрами системы представляются уравнением

$$f(P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m) = 0,$$

где $1 \leq i \leq k$, $k+1 \leq s \leq m$.

Величины, входящие в это уравнение, можно представить в виде произведений их числовых значений $\{P\}$ на единицу $[P]$ данной величины: $P = \{P\} [P]$.

Если в выбранной системе единиц имеется $k=q$ основных единиц, то, обозначая их через $a, b, \dots, q$, можно записать выражения единиц всех участвующих величин, т. е. их формулы размерностей:

$$\begin{aligned} [p_1] &= [a^{\alpha_1} b^{\beta_1} \dots q^{\xi_1}]; \\ [p_2] &= [a^{\alpha_2} b^{\beta_2} \dots q^{\xi_2}]; \\ [p_i] &= [a^{\alpha_i} b^{\beta_i} \dots q^{\xi_i}]; \\ [p_k] &= [a^{\alpha_k} b^{\beta_k} \dots q^{\xi_k}]; \\ [p_s] &= [a^{\alpha_s} b^{\beta_s} \dots q^{\xi_s}]; \\ [p_m] &= [a^{\alpha_m} b^{\beta_m} \dots q^{\xi_m}], \end{aligned}$$

где $\alpha, \beta, \dots, \xi$ — некоторые числа.

Матрица размерностей всех m параметров имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \dots & \xi_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \xi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_i & \beta_i & \dots & \xi_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_k & \beta_k & \dots & \xi_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_s & \beta_s & \dots & \xi_s \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_m & \beta_m & \dots & \xi_m \end{pmatrix}.$$

Если единицы величин $[p_1], \dots, [p_k]$ независимы, то формула размерностей любой из этих единиц не может быть представлена как комбинация (полученная посредством умножения или деления) из формул размерностей остальных независимых единиц. При этом для независимости требуется неравенство нулю хотя бы одного определителя D , составленного из показателей степени

$$\beta'_i = -1; \xi'_i = 0; \alpha'_L = 0; \beta'_L = 2; \xi'_L = 1;$$

$$\alpha'_t = 0; \beta'_t = 1; \xi'_t = 1; \alpha'_\omega = 0;$$

$$\beta'_\omega = -1; \xi'_\omega = -1.$$

В результате получим окончательные выражения для одной из форм записи критериев подобия процесса, протекающего при включении цепи R, L, C на напряжение $u = U \sin \omega t$:

$$\pi'_1 = iR/U; \pi'_2 = L/R^2 C;$$

$$\pi'_3 = t/RC; \pi'_4 = \omega RC.$$

Критерии подобия, полученные непосредственно из уравнения (способом интегральных аналогов), в общем случае являющиеся степенными функциями критериев, полученных на базе π -теоремы, и лишь в частном случае совпадают с последними. Рассмотренный пример позволяет убедиться в этом. Полученные выше способом интегральных аналогов критерии $\pi'_1 - \pi'_4$ можно выразить через критерии $\pi'_1 - \pi'_4$:

$$\pi_1 = U/iR = 1/\pi'_1; \pi_2 = L/Rt = \pi'_2/\pi'_3;$$

$$\pi_3 = t/RC = \pi'_3; \pi_4 = \omega t = \pi'_3/\pi'_4.$$

3. Определение критериев подобия применением системы относительных единиц. Данный способ определения критериев является модификацией первых двух способов. Из основных теорем подобия следует, что, если параметры, характеризующие одно явление P'_1 , выражены в долях некоторых определенным образом выбранных базисных величин P'_{16} , а для второго явления сходственные параметры P'_2 выражены в долях базисных величин P'_{26} , выбранных таким же образом, то при равенстве относительных значений сходственных параметров $P_* = P'_1/P'_{16} = P'_2/P'_{26}$ первое и второе явления могут быть подобны.

Пусть имеется явление, которое описывается в общем виде уравнением $f_1(P_1, P_2, \dots, P_k, P_{k+1}, \dots, P_s, \dots, P_m) = 0$.

Выразим параметры $P_1, \dots, P_m$ в относительных единицах, приняв за базисные соответственно $P_{16}, \dots, P_{m6}$. Согласно π -теореме только часть характеризующих явление параметров, а именно k , являются независимыми (величины имеют независимые единицы), остальные же $m-k$ параметров зависимы. Аналогичное утверждение, конечно, справедливо и для базисных величин, поскольку их размерности совпадают с размерностями соответствующих параметров. Поэтому из m базисных величин только k величин, соответствующих независимым параметрам, могут быть выбраны произвольно. Это значит, что построение системы базисных величин должно отвечать построению той системы единиц, в которой измерены участвующие в явлении величины P , а следовательно, и базисные величины.

Из сказанного вытекает последовательность определения критериев подобия на основе применения системы относительных единиц:

1) выявление m параметров $P_1, P_2, \dots, P_k, P_{k+1}, \dots, P_m$, которые характеризуют изучаемый процесс;

2) составление матрицы A размерностей m параметров;

3) установление числа k независимых единиц этих параметров, равного рангу матрицы A ;

4) выбор k независимых базисных величин $P_{16}, \dots, P_{k6}$;

5) определение $m-k$ зависимых базисных величин исследуемого процесса;

6) запись всех m параметров исследуемого процесса в относительных единицах.

Следовательно, только равенства всех параметров, выраженных в относительных единицах, еще не достаточно для того, чтобы имелось подобие явлений. Поэтому выраженные в относительных единицах параметры становятся критериями подобия только при соблюдении указанных выше дополнительных условий, накладываемых на выбор базисных величин.

В рассматриваемом примере семь участвующих величин (i, U, R, L, C, t, ω) и три независимые единицы измерения ($k=3$). Выражения

$$i_* = i/i_6; U_* = U/U_6;$$

$$R_* = R/R_6; L_* = L/L_6;$$

$$C_* = C/C_6; t_* = t/t_6;$$

$$\omega_* = \omega/\omega_6$$

станут критериями подобия, если построение системы базисных величин ($i_6, U_6, R_6, L_6, C_6, t_6, \omega_6$) будет отвечать построению той системы единиц, в которой измерены участвующие в явлении величины. Выберем в качестве независимых три базисные величины: U_6, R_6 и C_6 .

Ранее было показано, что

$$[i] = [U]^1 [R]^{-1} [C]^0; [L] = [U]^0 [R]^2 [C]^{+1};$$

$$[t] = [U]^0 [R]^1 [C]^1; [\omega] = [U]^0 [R]^{-1} [C]^{-1}.$$

Отсюда вытекают условия, накладываемые на выбор зависимых базисных величин:

$$i_6 = U_6/R_6; L_6 = R^2_6 C_6;$$

$$t_6 = R_6 C_6; \omega_6 = 1/R_6 C_6.$$

6.4. ДВЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ДРУГИХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

1. Частная задача — определение критериев неполного подобия (во времени), т. е. подобия электрических цепей.

2. Общая задача — определение критериев полного подобия (во времени и пространстве) электромагнитных полей.

1. Критерии подобия электрических цепей

1а. Критерии подобия цепей с сосредоточенными постоянными параметрами. Интегральные аналоги указывают критерии подобия

$$\pi_1 = u/iR; \pi_2 = L/Rt = T_L/t;$$

$$\pi_3 = t/RC = t/T_C,$$

где безразмерные величины $T_L/t = T_{L*}$ и $T_C/t = T_{C*}$ называются *относительными постоянными времени*. Для подобия процессов в цепях R , L , C необходимо и достаточно обеспечить равенство критериев π_2 и π_3 [согласно π -теореме (см. § 6.2) $\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3)$]. Этот вывод в соответствии с первым дополнительным положением (см. § 6.2) распространяется на сколь угодно сложную цепь, если только все отдельные участки этой цепи будут соответственно подобны и соединены друг с другом подобным образом. Если ЭДС изменяется по какому-либо заданному закону, то согласно второму дополнительному положению (см. § 6.2) относительные характеристики должны быть соответственно одинаковыми. Это требование, выраженное математически ($U_{1*} = U_{2*} = \text{idem}$), будет дополнительным критерием подобия.

Правило: подобие цепей с сосредоточенными постоянными параметрами требует одинаковых критериев подобия — относительных постоянных времени всех элементов; при этом в случае периодически изменяющихся ЭДС дополнительным условием (критерием) будет $\omega t = \text{idem}$. При любом изменении ЭДС их относительные характеристики должны быть соответственно одинаковы.

16. *Критерии подобия цепей, имеющих взаимно индуктивную связь.* Рассмотрим простейшую цепь, состоящую из двух контуров, один из которых имеет параметры R_1 , L_1 и включается на постоянное напряжение u , а второй короткозамкнут и характеризуется параметрами R_2 и L_2 . Взаимная индуктивность между контурами M_{12} . Для такой цепи уравнение, связывающее критерии подобия, имеет вид [6.1]:

$$\pi_1' = u/i_1 R_1 = \Phi(\pi_2', \pi_3', \pi_4', \pi_5'),$$

где

$$\pi_2' = L_1/R_1 t = T_{L1}/t = T_{L1*};$$

$$\pi_3' = M_{12}/R_1 t = T_{M1}/t = T_{M1*};$$

$$\pi_4' = L_2/R_2 t = T_{L2}/t = T_{L2*};$$

$$\pi_5' = M_{12}/R_2 t = T_{M2}/t = T_{M2*}$$

— относительные постоянные времени.

Указанные критерии подобия останутся справедливыми и в случае сложной разветвленной цепи, содержащей любое количество взаимных индуктивностей и любое число источников питания.

1в. *Подобие цепей с сосредоточенными нелинейными параметрами.* Согласно второму дополнительному положению (см. § 6.2) дополнительным условием подобия цепей с нелинейным параметром $P_x = f(P_y)$ будет идентичность относительных характеристик нелинейного параметра $P_{x*} = \varphi_*(P_{y*})$ или $\varphi_* = \text{idem}$, где $P_{x*} = P_x/P_{6x}$, $P_{y*} = P_y/P_{6y}$, P_{6x} и P_{6y} — характерные значения параметров.

Например, при установлении подобия цепей, содержащих катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником, можно оперировать характеристикой $\mu_{a*} = f(H_*)$, где μ_a — абсолютная

магнитная проницаемость; H — напряженность магнитного поля.

1г. *Критерии подобия цепей с взаимно перемещающимися контурами.* Электрические машины:

1) критерий электромагнитных и электрических скоростей $T_* = \text{idem}$ ($T_{L*} = L/Rt = \text{idem}$, $T_{ab*} = M_{ab}/R_a t = \text{idem}$, $T_{b*} = M_{ab}/R_b t = \text{idem}$);

2) критерий механической скорости $T_{J*} = T_J/t = \text{idem}$ (T_J — постоянная инерции электрической машины);

3) критерий гомотокронности $t_* = \text{idem}$ ($\omega t = \text{idem}$).

Из условия 3) следует, что изменять масштаб времени при исследовании процессов, происходящих в машинах переменного тока, можно только одновременно с изменением частоты. Изменять частоту так, чтобы обеспечить одинаковое значение ωt в модели и в оригинале, довольно затруднительно. Однако оказывается возможным получать *приближенное подобие процессов, изменяя масштаб времени с нарушением критерия гомотокронности*.

Из условий 2) и 3) (T_J/t) ($1/\omega t$) = idem . Если при этом в модели и оригинале $\omega = \text{idem}$ и $T_* = T_k/t = \text{idem}$, где $k = L, ab, ba, \dots$, то получается критерий приближенного электромеханического подобия: $T_J/T_k^2 = \text{idem}$.

1д. *Критерии подобия цепей с распределенными параметрами.* Для дальних линий электропередачи, линий связи и т.п. можно записать [6.1]:

$$\pi_1 = \frac{i}{u} \sqrt{\frac{R}{G}} = \varphi(\pi_2, \pi_3, \pi_4),$$

где

$$\pi_2 = L/Rt = T_L/t = T_{L*};$$

$$\pi_3 = C/Gt = T_C/t = T_{C*}; \quad \pi_4 = l\sqrt{RG};$$

R , L , C , G — соответственно сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость линии на единицу длины. Критерий π_4 представляет собой дополнительное условие подобия цепей с распределенными параметрами.

2. Критерии подобия электромагнитных полей в однородной изотропной среде

Из уравнений Максвелла для полупроводящей среды получается выражение [6.1]

$$\pi_1 = \frac{E\gamma l}{H} = f_1(\pi_2, \pi_3) = f_1\left(\frac{\mu_a \gamma l^2}{t} \cdot \frac{\epsilon_a}{\gamma t}\right),$$

где H — напряженность магнитного поля; E — напряженность электрического поля; γ — удельная электрическая проводимость среды; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды; l — характерный геометрический размер; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Рассматривая проводящую среду ($\epsilon_a = 0$), можно в этом выражении исключить критерий π_3 :

$$\pi_1 = \frac{E\gamma l}{H} = f_2(\pi_2) = f_2\left(\frac{\mu_a \gamma l^2}{t}\right).$$

Подобие электромагнитного поля в диэлектрике ($\gamma = 0$) лучше устанавливать, используя уравнение

$$\pi_1' = \frac{E\epsilon_a l}{Ht} = f_3(\pi_2', \pi_3', \pi_4') =$$

Т а б л и ц а 6.1

Название критерия	Уравнение критерия
Критерий гомохронности	$[Ho] = \omega t = \text{idem}$
Основные критерии подобия электромагнитных явлений	$\pi_1 = \frac{\mu_a \gamma l^2}{t} = \text{idem}; \pi_2 = \frac{\varepsilon_a}{\gamma t} = \text{idem}$
Критерии подобия цепей с сосредоточенными или распределенными постоянными (в последнем случае параметры берутся на единицу длины)	$T_{C*} = \frac{C}{Gt} = \text{idem}$ $T_{L*} = \frac{L}{Rt} = \text{idem}$ $RGL^2 = \text{idem}$
Дополнительное условие подобия цепей с распределенными параметрами	$\frac{M_{ab}^2}{L_a L_b} = \text{idem}; \frac{M_{ab}^2}{R_a R_b t^2} = \text{idem}$
Критерии подобия цепей с взаимной индукцией при разных масштабах токов во взаимосвязанных цепях	$T_{ab*} = \frac{M_{ab}}{R_a t} = \text{idem}$ $T_{ba*} = \frac{M_{ab}}{R_b t} = \text{idem}$
Критерии подобия цепей с взаимной индукцией при одинаковом масштабе токов во взаимосвязанных цепях	$P_{x*} = \varphi_*(P_{y*}) \text{ или } \varphi_* = \text{idem}$ $P_{x*} = \frac{P_x}{P_{6x}}; P_{y*} = \frac{P_y}{P_{6y}}$
Критерий нелинейного или неоднородного подобия (при нелинейности параметра $P_x = \varphi(P_y)$, где P_{6x}, P_{6y} — характерные параметры)	$\mu_{a*} = \frac{\mu_a}{\mu_{ak}} = f\left(\frac{H}{H_k}\right) = \text{idem}$ или $\mu_{a*} = f(H_*) = \text{idem}$
Критерии подобия процессов при нелинейных магнитных материалах (идентичность относительных характеристик). Здесь μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, H — напряженность магнитного поля	$T_{J*} = \frac{T_J}{t} = \text{idem}$ $\frac{T_J}{T_k^2} = \text{idem}$
Критерий электродинамического подобия	
Критерий приближенного электромагнитного и электродинамического подобия	

Т а б л и ц а 6.2

Наименование величины	Уравнение связи	Масштаб подобия и его выражение через независимые масштабы
Магнитодвижущая сила	$F = \int_l H_l dl$	$m_F = m_H m_l = m_I$
Электрическое напряжение (разность потенциалов)	$U = \int_l E_l dl$	$m_U = m_H = m_\gamma^{-1}$
Магнитный поток	$\Phi = \int_S I_n dS$	$m_\Phi = m_H m_l^2 m_\mu$
Ток	$I = \int_S J_n dS$	$m_I = m_H m_l$
Электрическое сопротивление	$R_l = U_l / I_l$	$m_R = m_l^{-1} m_\gamma^{-1}$
Индуктивность (взаимоиндуктивность)	$L_l = \frac{1}{I_l} \int_{S_l} B_n dS$	$m_L = m_l m_\mu$
Энергия магнитного поля	$W = \int_V \frac{HB}{2} dV$	$m_W = m_H^2 m_l^3 m_\mu$
Мощность	$P = \frac{dW}{dt}$	$m_P = m_H^2 m_l m_\gamma^{-1}$
Электромагнитная сила	$N = \int_V J \times B dV$	$m_N = m_H^2 m_l^2 m_\mu$

П р и м е ч а н и е. J — плотность тока; S — поверхность; V — объем.

$$= f_3 \left(\frac{\mu_a \varepsilon_a l^2}{t^2}, \frac{\rho l^2}{Ht}, \frac{\gamma t}{l} \right),$$

где ρ — объемная плотность заряда; v — скорость движения зарядов.

При отсутствии зарядов ($\rho = 0, v = 0$) получим:

$$\pi_1' = \frac{E \varepsilon_a l}{Ht} = f_4(\pi_2') = f_4 \left(\frac{\mu_a \varepsilon_a l^2}{t^2} \right).$$

Критерии подобия электромагнитных полей,

создаваемых периодическими переменными токами частотой $\omega = 2\pi f$, остаются теми же, но их следует дополнить критерием гомохронности $\pi_{Ho} = \omega t$.

Условия подобия в случае неоднородных и анизотропных сред должны устанавливаться в соответствии с третьим и четвертым дополнительными положениями (см. § 6.2). Основные критерии электротехнического подобия представлены в табл. 6.1. В табл. 6.2 показана связь между масштабами подобия величин электромагнитного поля и масштабами интегральных величин электрических цепей.

6.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ В КРИТЕРИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Четко провести эксперимент, объективно оценить сведения об изучаемом процессе и *распространить материал, полученный в одном исследовании на серию других исследований*, можно, если правильно их поставить и обработать (при обобщенном подходе).

Критериальная обработка результатов экспериментальных исследований позволяет: а) сократить количество необходимых экспериментов за счет уменьшения числа варьируемых факторов; б) распространить результаты каждого из этих экспериментов на неограниченно большой класс подобных процессов.

Критериальная обработка экспериментальных данных при неизвестном математическом описании процесса. Обработка полученных данных должна проводиться в *критериальной форме*, которую покажем на конкретном примере.

Пусть изучается процесс в цепи, содержащей активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , подключенной к источнику постоянного напряжения U . Оценим влияние вариаций параметров R , L , C и U в заданных диапазонах на максимальное значение тока в цепи, т.е. изучим зависимость

$$i_{\max} = f(R, L, C, U).$$

Критерии подобия процесса определим на основе анализа размерностей (см. § 6.3) параметров i , R , L , C , U .

Выбирая в качестве независимых параметры U , R и C , получаем:

$$\pi_1 = iR/U; \quad \pi_2 = L/R^2C.$$

При представлении в критериальной форме исследуемая зависимость примет вид

$$\pi_i = \frac{i_{\max} R}{U} = \Phi \left(\frac{L}{R^2 C} \right).$$

Переход к критериям подобия уменьшает количество варьируемых факторов с четырех (R , L , C , U) до одного ($L/R^2 C$). Это сокращает количество опытов, необходимых для экспериментального определения искомой зависимости. Достаточно будет провести 3 — 4 опыта, варьируя значение безразмерного комплекса π_2 путем изменения значения одного из входящих в него параметров, например R . Полученная кривая позволит оценить влияние на $i_{\max}$ не только сопротивления R , но и остальных параметров L , C , U , причем каждая точка этой кривой, например, точка $\pi_i'(\pi_2')$ будет соответствовать бесконечному количеству подобных процессов ($\pi_i' = \text{idem}$, $\pi_2' = \text{idem}$).

Критериальная обработка результатов исследования при известном математическом описании изучаемого процесса. В уравнения переходного процесса и начальные (граничные) условия входят: параметры системы и фиксированные значения параметров режима (начальные значения, гранич-

ные значения, значения неизменяющихся параметров режима и т. д.) $P_1, \dots, P_k$;

текущие значения параметров режима $P_{l+1}, \dots, P_{l+n}$.

Для приведения математического описания процесса к критериальному виду необходимо:

1) составить матрицу размерностей A всех участвующих в процессе параметров ($P_1, \dots, P_l, P_{l+1}, \dots, P_{l+n}$) и определить ранг $r_A = k$ этой матрицы (см. § 6.3);

2) выбрать в качестве независимых параметров k величин из числа параметров системы и фиксированных значений параметров режима $P_1, \dots, P_k$ ($k \leq l$);

3) определить на основе анализа размерностей соответствующую форму записи:

а) безразмерных комплексов, составленных из параметров системы и фиксированных значений параметров режима,

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{x_1+1} P_2^{y_1+1} \dots P_k^{z_1+1}};$$

$$\pi_{l-k} = \frac{P_l}{P_1^{x_l} P_2^{y_l} \dots P_k^{z_l}};$$

б) критериев подобия, каждый из которых в числителе содержит текущее значение параметров режима (в дальнейшем будем называть такие критерии текущими значениями критериальных параметров режима):

$$P_{l+1}^* = \frac{P_{l+1}}{P_1^{x_{l+1}} P_2^{y_{l+1}} \dots P_k^{z_{l+1}}};$$

$$P_{l+n}^* = \frac{P_{l+n}}{P_1^{x_{l+n}} P_2^{y_{l+n}} \dots P_k^{z_{l+n}}};$$

4) в уравнениях процесса и начальных (граничных) условиях заменить параметры $P_1, \dots, P_k$ на единицы, параметры $P_{k+1}, \dots, P_l$ — на безразмерные комплексы $\pi_1, \dots, \pi_{l-k}$, а текущие значения параметров режима $P_{l+1}, \dots, P_{l+n}$ — на текущие значения критериальных параметров режима.

Пример. Приведем к критериальному виду уравнение:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + Ri = U.$$

В это уравнение входят: параметры системы R , L , C и фиксированное значение параметра режима U ; текущие значения параметров режима i и t . Ранг матрицы размерностей параметров R , L , C , U , i , t равен трем (см. § 6.3). Выберем независимыми параметры системы R , C и фиксированное значение параметра режима U . Анализ размерностей дает:

$$\pi_1 = \frac{L}{R^2 C^1 U^0} = \frac{L}{R^2 C}$$

и текущие значения критериальных параметров режима

$$i^* = \frac{i}{R^{-1} C^0 U^1} = \frac{iR}{U};$$

$$t^* = \frac{t}{R^1 C^1 U^0} = \frac{t}{RC}.$$

Заменяв в исходном уравнении параметры R , C , U на единицы, параметр L на безразмерный комплекс π_1 , а

текущие значения i , t на текущие значения критериальных параметров режима i_* , t_* , получим уравнение, приведенное к критериальному виду:

$$\pi_1 \frac{di_*}{dt_*} + \int i_* dt_* + i_* = 1.$$

Результаты любых расчетов, проводимых по этому уравнению, будут представлены в критериальной форме и справедливы для неограниченно большого класса подобных процессов.

В рассмотренном выше примере использован способ определения критериев подобия на основе анализа размерностей (π -теоремы). Этот способ позволяет проводить критериальную обработку результатов исследования не только в тех случаях, когда математическое описание процесса известно, но и в случаях, когда описание неизвестно и имеется лишь список участвующих в процессе параметров. При анализе и оптимизации установившихся режимов, оптимизации проектных решений для определения критериев подобия удобно использовать способ относительных единиц (см. § 6.3), выбирая в качестве базисных величин параметры оптимального режима (варианта) [6.2]. Представление результатов исследований в критериальной форме применяется при решении электромеханических [6.3], электроэнергетических [6.1] и других задач.

Критериальное планирование эксперимента (КПЭ). Теория планирования эксперимента и теория подобия, способствующие наилучшей организации эксперимента и обработке его результатов, объединяются в настоящее время [6.1, 6.4].

Пусть требуется изучить зависимость

$$P = \varphi(P_1, \dots, P_k, P_{k+1}, \dots, P_l),$$

которая связывает целевую функцию эксперимента P с параметрами системы и фиксированными значениями параметров режима $P_1, \dots, P_l$. Целевой функцией могут являться экстремальное значение параметра режима, характерное значение параметра системы (например, предельное значение по условию сохранения устойчивости системы) и т.д.

Для КПЭ необходимо:

1) определение вида безразмерных комплексов π_i , текущих значений критериальных параметров режима $P_{l+1}^*, \dots, P_{l+n}^*$ и критериальной целевой функции π_P ; если уравнения процесса известны, следует преобразовать эти уравнения и начальные (граничные) условия и привести их к критериальному виду в соответствии с описанным выше способом;

2) определение диапазонов варьирования безразмерных комплексов по заданным интервалам варьирования параметров $P_1, \dots, P_k$;

3) выявление доминирующих безразмерных комплексов $\pi_1, \dots, \pi_m$ в результате проведения опытов (расчетов) в соответствии с матрицей критериального планирования отсеивающего эксперимента;

4) проведение опытов (расчетов) в соответствии с матрицей критериального планирования актив-

ного или пассивного эксперимента в целях определения коэффициентов полинома¹:

$$\pi_P = d_0 + \sum_{i=1}^m d_i \pi_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m d_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=1}^m d_{ii} \pi_i^2 + \dots$$

Если эксперименты проводятся в реальной системе или на физической модели, в матрицу КПЭ, содержащую в качестве варьируемых факторов безразмерные комплексы, необходимо ввести еще значения варьируемых параметров $P_1, \dots, P_l$.

Полученный в результате проведения минимального количества опытов (расчетов) полином, связывающий безразмерные комплексы, позволяет не только изучить конкретную зависимость, но и распространить результаты этих опытов на широкий класс процессов, подобных данному. Примеры применения метода КПЭ рассмотрены в [6.1, 6.3, 6.4].

6.6. РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физическое подобие может быть осуществлено: при натурном моделировании, когда в объект, подлежащий исследованию, не вносятся изменений и не создаются специальных установок (производственный эксперимент; моделирование путем обобщения сведений о явлениях или отдельных процессах, происходящих в натурном объекте и т. д.) [6.1]; на специальных моделях и стендах.

Для всякой модели всегда четко формулируется круг задач, который будет решаться с помощью данной модели. Это выявляет те части оригинала, которые должны быть воспроизведены на модели с наибольшей полнотой и точностью, требуемыми теорией подобия (условия соблюдения критериев подобия) и практической необходимостью. Например, если физическая модель энергосистемы, представляющая собой миниатюрную копию реальной энергосистемы, сооружается для изучения переходных процессов, протекающих в электрической части системы, то тепловая и гидравлическая части системы (котлы, турбины и т. п.) могут моделироваться приближенно с помощью математических моделей.

Модели энергосистем, включающие в себя наряду с физически смоделированными элементами и математические модели отдельных элементов энергосистем, иногда называют *электродинамическими моделями*. Они нашли большое распространение на практике².

Физические модели наиболее точно отражают явления в оригинале и при необходимости позволяют воспроизводить в модели совокупность электромагнитных, механических, тепловых и других

¹ При учете влияния стохастических факторов этот полином представляет собой уравнение регрессии.

² Краткое описание основных электродинамических моделей приведено в [6.5].

явлений. Этим объясняется привлекательность физического моделирования и его применение во многих областях современной электротехники и электроэнергетики. Примеры использования физического моделирования как метода изучения сложных явлений в электротехническом оборудовании, сооружениях и системах рассмотрены в [6.1, 6.5].

Физические модели особенно эффективны при анализе роли факторов, математическое описание действия которых не обладает достаточной достоверностью или отсутствует, а также при исследовании влияния новых средств автоматизации и управления в условиях, близких к натурным. Важной особенностью физической модели является возможность непосредственного подключения к ней натуральных регулирующих или защитных устройств, в том числе новых, характеристики и поведение которых подлежат изучению.

Порядок исследований при решении задач:

1. Определяются критерии подобия, для чего предварительно оцениваются параметры, входящие в эти критерии, выясняются наиболее существенные для протекания данного процесса.

2. Выбираются масштабы, при которых учитываются как постановка задачи, так и возможности оборудования.

Неудачный выбор масштабов может привести к тому, что параметры оборудования модели будут отличаться от расчетных, скажется влияние нагрева элементов, приводящего к изменению активных сопротивлений, и т. п.

Каждому исследованию, проводимому на модели, должна предшествовать тщательная проверка всех параметров модели.

3. Сооружается модель, параметры которой устанавливаются такими, чтобы критерии подобия модели были соответственно одинаковыми с критериями подобия оригинала.

Возможны случаи, когда модель специально не сооружается, при этом используются какие-либо подходящие установки, а эксперимент ставится так, чтобы приблизиться к подобию процесса.

4. Проверяется работа оборудования модели по отдельным частям. Только после того, как получена полная уверенность, что все элементы модели в отдельности подобны соответствующим элементам оригинала, можно собрать модель в целом, соблюдая граничные условия при соединении ее отдельных элементов.

5. Проводятся эксперименты на модели; при этом желательно использование КПЭ (см. § 6.5) и представление полученных результатов в виде *критериальных зависимостей*.

6.7. РЕАЛИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Если явления в двух сопоставляемых системах имеют различную физическую природу, но некоторые наиболее интересные для исследователя процессы, происходящие в двух системах, описываются *формально одинаковыми* дифференциальными уравнениями, то можно сказать, что одна система

является *прямой моделью-аналогом* другой. *Структурное моделирование* — разновидность аналогового моделирования, при которой в модели представлена структура описывающих изучаемый процесс уравнений, расчлененных на математические операции (интегрирование, суммирование, умножение, нелинейное преобразование и др.).

Примером электрических *моделей прямой аналогии* являются расчетные модели постоянного и переменного тока [6.1], которые в течение многих лет были основным средством расчета режимов и устойчивости энергосистем. В практике исследования магнитных полей в электрических машинах и других электротехнических устройствах используется прямое аналоговое моделирование магнитных полей с помощью электропроводящих сред.

В применении прямых моделей-аналогов имеется серьезное ограничение, поскольку не для всех задач можно выявить аналогию и подобрать модель. В этом отношении структурные модели, поэлементно моделирующие отдельные математические операции, более универсальны и обеспечивают большую точность.

Для решения электротехнических, электромеханических и электроэнергетических задач используются *универсальные структурные аналоговые модели* (аналоговые вычислительные машины), а также *специализированные аналоговые модели* (установки для исследования электромеханических переходных процессов в энергосистемах и др.).

Широкое применение аналоговых моделей обусловлено простотой, наглядностью, быстротой и возможностью анализа процессов в ускоренном времени, возможностью присоединения к модели отдельных систем-оригиналов, подлежащих исследованию. Так, к модели можно присоединить натурные регуляторы и получать переходный процесс с учетом их действия.

Особенности обеспечения подобия при моделировании на аналоговых вычислительных машинах (АВМ) [6.1, 6.6]:

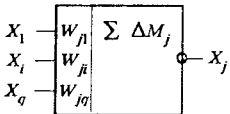
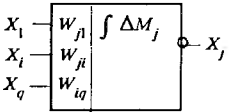
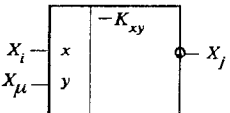
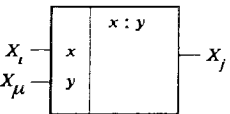
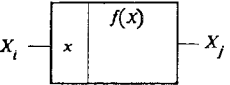
а) масштабы m_j являются в общем случае размерными величинами и связывают параметры режима в оригинале с машинными переменными X_j ; влияние параметров системы в оригинале на условия подобия проявляется через значения коэффициентов a_j моделируемой системы уравнений;

б) машинными переменными в АВМ являются напряжения на входах и выходах решающих блоков, и число этих переменных может превышать число уравнений моделируемого процесса, так как между машинными переменными могут существовать некоторые дополнительные зависимости, которые в явном виде отсутствуют в исходных уравнениях;

в) условия подобия получаются на основе первой теоремы подобия (см. § 6.2) и связывают коэффициенты a_j с масштабами m_j и коэффициентами передачи решающих блоков; условия подобия для основных типовых решающих блоков приведены в табл. 6.3;

г) при выборе масштабов следует учитывать, что в АВМ рабочий диапазон выходных напряжений

Т а б л и ц а 6.3

Название блока	Условное обозначение блока	Формула операции, выполняемой блоком	Машинное уравнение блока	Условие подобия
Суммирующий		$z = \sum_{i=1}^q a_i x_i$	$X_j = - \sum_{i=1}^q K_{ji} X_i$	$K_{ji} = \frac{m_j a_i}{m_i}$
Интегросуммирующий		$z = \int \sum_{i=1}^q a_i x_i dt$	$X_j = - \int \sum_{i=1}^q K_{ji} X_i dt$	$K_{ji} = \frac{m_j a_i}{m_i m_t}$
Умножения		$z = x_i x_{\mu}$	$X_j = K X_i X_{\mu}$	$m_j = K m_i m_{\mu}$ $K = \text{const}$ $K = \frac{m_i}{m_i m_{\mu}}$ $K \neq \text{const}$
Деления		$z = \frac{x_i}{x_{\mu}}$	$X_j = \frac{X_i}{X_{\mu}}$	$m_i = m_j m_{\mu}$
Функционального преобразования		$z = f(x)$	$X_j = m_j f\left(\frac{X_i}{m_i}\right)$	—

П р и м е ч а н и е. K — конструктивный коэффициент блока; M_j — коэффициент усиления; $K_{ji} = M_j W_{ji}$ — коэффициент передачи по i -му входу.

обычно составляет ± 10 В, ± 50 В, ± 100 В. При моделировании требуется рационально выбрать масштаб времени и масштабы переменных, чтобы наиболее полно использовать диапазон напряжений решающих блоков и тем повысить точность моделирования.

Для реализации аналогового подобия процесса в модели процессу в оригинале необходимо:

- 1) написать уравнения, описывающие процесс;
- 2) составить принципиальную схему для решения задачи на модели;
- 3) из табл. 6.3 для каждого решающего блока выписать условия подобия;
- 4) после вычисления максимальных значений масштабов выходных величин всех блоков по формуле

$$m_{j \max} = \frac{X_{\max}}{x_{j \max}},$$

где $x_{j \max}$ — предполагаемое максимальное значение моделируемой переменной, выбрать близкие к максимальным значения m_j и вычислить значения коэффициентов передачи, исходя из условий подобия и значений коэффициентов a_i моделируемой системы уравнений;

- 5) составить рабочую схему соединения элементов;

6) набрать рабочую схему на коммутационном поле АВМ, задать начальные условия, осуществить пуск машины и зарегистрировать получаемое решение с помощью электронно-лучевого индикатора, светолучевого осциллографа и т. п.

Для успешного моделирования на АВМ недостаточно формального выполнения указанных выше действий. Необходимо глубокое понимание физического смысла решаемой задачи и знание выработанных практикой приемов моделирования¹.

6.8. РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цифровые ЭВМ не являются моделирующими устройствами какого-либо конкретного процесса в том смысле, какой обычно на основе наших привычных представлений вкладывается в понятие «моделирование». Но после разработки математического описания изучаемого процесса, алгоритма, программы и их апробации (сопоставлением с экспериментальными данными или специальными

¹ Практические вопросы аналогового моделирования и технические характеристики некоторых современных АВМ рассмотрены в [6.6].

тестами) комплекс «алгоритм — программа — ввод — ЭВМ — вывод» может рассматриваться как математическая цифровая модель изучаемого процесса, обеспечивающая решение научных и технических задач.

Подобие в математических цифровых моделях, если абстрагироваться от имеющихся погрешностей, превращается относительно рассматриваемых процессов в свой частный случай — тождество, поскольку на выходе ЭВМ исследователь непосредственно получает представленную в дискретной форме информацию об изучаемом процессе. В этом отличие цифровых моделей от физических и аналоговых моделей, характеристики которых для получения характеристик оригинала приходится пересчитывать через масштабы и при реализации которых необходимо обеспечивать равенство критериев подобия в физической модели и в оригинале (см. § 6.6) и выполнение условий подобия при моделировании на АВМ (см. табл. 6.3). Вместе с тем, применение теории подобия дает возможность повысить эффективность математических цифровых моделей за счет представления выходной информации в *критериальной форме* (см. § 6.5), позволяющей распространить результаты расчетов на группы подобных явлений.

Цифровые ЭВМ применяются для двух основных направлений. Для первого — это работа *в натуральном времени происходящих процессов*.

В этом случае данные для вычислений могут поступать в ЭВМ непосредственно от той системы, работа которой изучается или которой необходимо управлять. Здесь особенно важно быстроедействие машины и возможности ввода и вывода информации.

Для второго направления — *решения задач проектирования, планирования и прогнозирования* — нет необходимости работать в темпе процесса.

Однако очень большое количество уравнений, отвечающих, например, модели развития большой системы, также требует быстрогодействия ЭВМ для того, чтобы в небольшие сроки решить поставленные задачи.

Все шире применяются *гибридные модели* [6.1], использующие положительные специфические свойства аналоговых моделей (наглядность, быстроедействие, возможность изменения масштаба времени) и цифровых моделей (точность, хранение в памяти нужных данных, выполнение сложных логических операций и т.д.). В гибридной модели имеется полная возможность *эргатического* подхода к моделированию, предусматривающего вмешательство человека-оператора в процесс исследования или управления.

Весьма эффективными являются *цифро-аналого-физические комплексы*, включающие физическую модель исследуемой системы, отдельные аналоговые элементы, имитирующие действие автоматических устройств регулирования и управления, и управляющую ЭВМ, позволяющую автоматизировать управление в темпе процесса и использовать современные методы обработки ре-

зультатов измерений и анализа результатов исследования [6.1].

6.9. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Требования к точности результатов различны в зависимости от поставленных задач и характера исследований. Исследования, касающиеся проектных разработок, а также оценки и относительного сопоставления вариантов, не требуют высокой точности результатов. Однако точность результатов имеет весьма большое значение, если исследования проводятся применительно к конкретной схеме, а полученные результаты необходимо распространить на оригинал.

Оценка точности исследований, проводимых любыми методами моделирования (физического, математического — цифрового или аналогового), требует выявления степени соответствия принятого математического описания тем реально происходящим процессам, которые интересуют исследователя.

Выбор сложности (полноты, точности) математического описания изучаемого явления должен быть согласован с точностью задания параметров модели и оригинала. Важно, чтобы выбираемое описание было рассчитано на использование таких данных, которые можно реально получить с требуемой достоверностью.

Стремление исследователя к наивысшей адекватности математического описания, учету возможно большего количества деталей часто приводит к понижению реальной точности и практической ценности результатов моделирования. Обусловлено это тем, что усложнение математического описания повышает чувствительность результатов моделирования к погрешности исходных параметров [6.1]. Следовательно, нет смысла усложнять математическое описание и уменьшать связанные с ним погрешности моделирования до уровня, намного меньшего неопределенности, обусловленной неточностью исходных данных.

При реализации *математического цифрового* моделирования важно также согласовать полноту описывающих процесс уравнений с точностью метода решения этих уравнений. Бессмысленно проводить слишком точные решения уравнений, при составлении которых была значительно огрублена реальная картина явления. С другой стороны, чрезмерное усложнение математического описания может привести к повышению погрешностей в процессе решения. И в том, и в другом случае снижается общий уровень адекватности результатов моделирования.

При оценке достоверности результатов *математического аналогового* моделирования необходимо учитывать погрешности АВМ, обусловленные: неточностью решающих блоков; «дрейфом», вызывающим определенные изменения в блоках, проявляющиеся во время выполнения операций; возможными ошибками при наборе сложных схем и воспроизведе-

дении значений параметров, а также в связи с нарушением контактов между отдельными элементами; ограниченной точностью, с которой параметры могут быть введены в машину, и возможной погрешностью, с которой могут быть измерены результаты моделирования и др. [6.6].

Следует учитывать также, что вследствие влияния случайных факторов эксперименты, проводимые на АВМ (а также в оригинале и на физических моделях) принципиально не обеспечивают строгой однозначности результатов. При детерминированном задании исходных параметров результаты, получаемые на АВМ, имеют довольно заметный разброс, значение которого может быть в ряде случаев уменьшено специальными мерами. Физическая модель и, тем более, реальная исследуемая система при повторении опытов дают, как правило, еще больший разброс. Поэтому результаты единичного экспериментального исследования, поставленного на аналоговой или физической моделях, не обязательно должны совпадать с результатами исследования, поставленного в оригинале. Эти модели следует рассматривать как определенное, так или иначе отражающее стохастическую природу воспроизведения оригинала и соответственно оценивать получающиеся результаты [6.1].

При получении на основе *физического* моделирования характеристик тех или иных явлений необходимо учитывать факторы, обуславливающие расхождение результатов, получаемых в модели и в оригинале. К этим факторам относятся неточности, обусловленные:

1) определением или заданием параметров оригинала, входящих в критерии подобия, и воспроизведением параметров на модели; этого вида неточности можно свести к некоторым суммарным неточностям воспроизведения критериев подобия;

2) погрешностями измерений при проведении опытов; погрешности могут быть уменьшены многократным повторением измерений, выбором приборов надлежащей точности;

3) неполным учетом в модели факторов, заведомо влияющих на главные процессы, т.е. осуществлением приближенного моделирования вместо точного.

Непостоянство случайно изменяющихся параметров, входящих в критерии подобия, приводит к тому, что критерии подобия также оказываются подверженными случайным вариациям. Поэтому при оценке достоверности результатов моделирования систем, имеющих такие параметры, необходимо учитывать влияние случайных факторов.

Обычно в практических приложениях оценка достоверности результатов физического моделирования с учетом погрешностей задания и воспроизведения критериев подобия сводится к двум

задачам: а) оценке влияния стохастических вариаций критериев подобия; б) оценке погрешности реализации приближенного моделирования вместо точного.

Оценка погрешностей моделирования, связанных с неточностью воспроизведения критериев подобия, требует изучения характера связи между исследуемым процессом и количественными отклонениями критериев подобия, представляемой в виде уравнения регрессии. Его получают на основе применения метода КПЭ, который дает возможность в результате проведения минимума расчетов и экспериментов выявить доминирующие критерии подобия (см. § 6.5). Полученная информация позволяет объективно решить задачу о необходимой точности воспроизведения критериев подобия и соответствующей степени их влияния на исследуемый процесс [6.1].

Погрешности, вызванные применением приближенного моделирования, выявляются двумя корректирующими друг друга путями. Первый путь — проверка опытом на основе *последовательного моделирования*. Моделируя одну и ту же систему в различных масштабах, при разных коэффициентах линеаризации и т. п., можно получить информацию о возможном искажающем эффекте модели и о точности расчетных представлений.

Второй путь — исследование уравнений, положенных в основу приближенных критериев подобия, и проведение серий опытов и расчетов с разным сочетанием величин, входящих в приближенные критерии [6.1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 6.1. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высшая школа, 1984.
- 6.2. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1990, № 5. С.3—11.
- 6.3. Ильинский Н.Ф., Попов М.А. Теория подобия в электромеханике// Электричество. 1988. № 5. С.1—7.
- 6.4. Сыромятников С.Ю. О критериальном планировании эксперимента // Тр. МЭИ. 1992. Вып. 649. С.24—45.
- 6.5. Строев В.А., Штробель В.А. Роль физического моделирования на современном этапе исследования электроэнергетических систем// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1990. № 5. С. 12—19.
- 6.6. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Раздел 7

ИНЖЕНЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

СОДЕРЖАНИЕ

7.1. Общие сведения	142	7.5. Измерение параметров электрических процессов	155
7.2. Синтез экспериментального комплекса Основные задачи синтеза (145). Выбор структуры экспериментального комп- лекса (146). Оптимизация эксперимен- тального комплекса (149)	145	7.6. Особенности параметризации электри- ческих цепей (задачи параметриза- ции)	156
7.3. Преобразование сигналов в измери- тельном тракте	150	7.7. Автоматизация электротехнического эксперимента	157
Преобразование наблюдаемой величи- ны в измеряемую (150). Усреднение воздействия (150). Частотная селекция (151). Перенос или трансформация спектра (151). Дискретизация значе- ний наблюдаемой переменной (152)		Структура автоматизированного экспе- риментального комплекса (157). Авто- матизация сбора, передачи и первичной обработки информации (157). Автома- тизация управления режимами работы объекта эксперимента (158). Автомати- зация обработки измерительной инфор- мации и управления эксперимен- тальным комплексом (158). Архитекту- ра автоматизированного эксперимен- тального комплекса (158)	
7.4. Синтез алгоритма эксперимента	152	Список литературы	164
Взаимодействие объекта и аппаратуры (152). Выделение сигнала из помех (153). Планирование эксперимента (154)			

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Труд инженера относится к активной познавательной и созидательной деятельности человека. В своей работе инженер целенаправленно анализирует процессы в технических и природных системах и предпринимает действия по их направленному изменению, т. е. идет непрерывный процесс информационного обмена объект — субъект—объект. В этом процессе как одна из важнейших может быть выделена стадия инженерного эксперимента. Жестко ограничить понятие эксперимент, отделив его, с одной стороны, от теоретического анализа, а с другой стороны, от производственного процесса и входящих в него процессов измерения и управления невозможно. Более того, многие теоретические, технические, организационные принципы являются общими для всех стадий указанного процесса информационного обмена. Так, методы, сформированные в теории планирования эксперимента, широко используются в системах управления и регулирования; измерительные процедуры являются неотъемлемой частью экспериментальной работы; при проведении инженерного эксперимента, как правило, важнейшим исходным материалом являются статистические характеристики производственного процесса. Тем не менее, понятие эксперимента как обязательной составляющей инженерной деятельности общепризнано, хотя строго определения этого понятия нет.

В настоящем разделе инженерный эксперимент понимается как отрезок процесса информационного обмена, на котором определяются или существенно уточняются качественные характеристики объекта или же происходит определение количественных характеристик в условиях их существенной

неопределенности. Таким образом, инженерный эксперимент как этап познавательного и созидательного процесса в семантическом отношении является наиболее информативным. Хотя определяемое формально количество информации в производственном процессе, передаваемое от субъекта к объекту через сигналы управления и от объекта к субъекту в виде результатов контрольных измерений, может значительно превышать объем информации на экспериментальном этапе, познавательное содержание этой информации существенно меньше.

Экспериментальные методы широко применяются в научных исследованиях, при разработке и испытаниях образцов новой техники. При этом решаются задачи:

поиск новых электрофизических явлений, проявляющихся в отклонении поведения объекта исследования от прогноза, составленного на основе имеющихся представлений;

проверка вновь выдвигаемых научных гипотез путем создания и наблюдения ситуаций, в которых проверяемая гипотеза (и только она) может объяснить поведение объекта;

проверка правильности модели объекта, использованной при проектировании и степени соответствия образца заданным требованиям;

количественная оценка влияния факторов, воздействие которых на объект исследования теоретически определено, но при проектировании или проверочном расчете по каким-либо причинам не может быть учтено в должной степени;

определение зависимостей между внешними переменными объектами, процесс функционирования которых частично (иногда в значительной

степени) неизвестен исследователю (работа с «черным ящиком»);

проверка адекватности и определение диапазона применимости функциональной модели объекта, построенной по его внешним характеристикам.

При этом применительно к структуре разработки промышленного изделия этапы работы, их цели и задачи, методы обработки результатов экспериментов приведены в табл. 7.1.

Реальный инженерный эксперимент является сложным итерационным процессом, в ходе которого экспериментатор многократно уточняет свою стратегию и тактику, однако на каждом частном цикле можно выделить три типичных шага.

Первый, наиболее ответственный шаг — постановка задачи. На этом шаге исследователь должен получить ответы на следующие вопросы (рис. 7.1):

что представляет собой объект исследования и какова цель исследования применительно к конкретному этапу эксперимента;

в каком виде желательно представить результаты;

какие ресурсы имеет исследователь, какими параметрами объекта и среды он может управлять;

что представляет собой результат эксперимента Y — количественно определенная величина, наилучшим образом отражающая цель исследования и

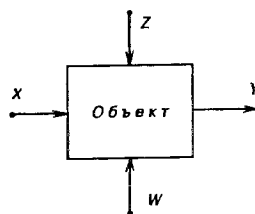


Рис. 7.1. К постановке задачи эксперимента

называемая в литературе функцией цели, откликом, признаком;

как измерять функцию цели;

каковы варьируемые факторы X — те, влияние которых интересует исследователя и которые необходимо варьировать в процессе эксперимента, как их измерять и (или) изменять;

каковы условия эксперимента Z — фиксированные значения параметров объекта и среды его функционирования, при которых проводится эксперимент и могут считаться справедливыми результаты исследования;

возможно ли существование случайных факторов W , влияющих на Y в каждом опыте и не подвластных исследователю.

Большинство задач в общем виде предполагают одну из следующих формулировок:

Т а б л и ц а 7.1

Цели	Задачи	Методы планирования и обработки результатов эксперимента
Познание природы объектов и явлений	Разработка и проверка теоретических гипотез	Разведочный анализ данных [7.1, 7.9] Описательная статистика [7.2] Корреляционный анализ [7.2]
Разработка адекватных моделей изделия или технологического процесса	Выявление параметров среды или объекта, влияющих на показатели его функционирования Построение регрессионной, интервальной и других моделей объекта Проверка адекватности модели	Метод случайного баланса [7.3] Дисперсионный анализ [7.4] Анализ размерностей [7.5] Планирование эксперимента [7.3] Многофакторный регрессионный анализ [7.3] Однофакторный регрессионный анализ
Проектирование изделия или технологического процесса Наладка оборудования Ориентация на рынке комплектующих и технологий	Определение оптимальных параметров объекта или процесса Выбор оптимальной номенклатуры комплектующих Выбор оптимальной структуры объекта Сравнительный анализ продукции, технических решений, альтернативных технологий	Регрессионный анализ [7.3] Методы оптимизационного эксперимента [7.6] Многомерный и многофакторный дисперсионный анализ [7.4] Многокритериальная оптимизация [7.3]
Подготовка изделий к серийному производству	Паспортизация изделий; измерение их параметров и характеристик, назначение допусков Технический контроль производства Оценка надежности изделий	Описательная статистика [7.2] Теория надежности [7.7]

найти в явном виде зависимость $Y = f(X)$, справедливую в условиях Z и W — интерполяционная задача;

найти такие оптимальные значения факторов X_{opt} , при которых в условиях Z и W функция цели достигает наилучшего в оговоренном смысле значения Y_{extr} — оптимизационная задача.

Паспортизация изделий, к примеру, является вырожденным случаем интерполяционной задачи, когда отсутствуют X и проводится оценка показателей Y при заданных Z - типе изделия и номинальных условиях его функционирования, а также при наличии случайных факторов W , обусловленных дрейфом технологии производства изделия и конечной точностью средств измерений.

Вычислительный эксперимент на математической модели объекта — пример интерполяционной либо оптимизационной задачи, в которой, как правило, отсутствуют W , роль X выполняют варьируемые параметры модели, а Z — структура модели и неизменные параметры. Примеры решения электротехнических задач различного типа приведены в [7.8].

Следующий шаг — выбор стратегии и планирование эксперимента — связан с преодолением трех трудностей, часто встречающихся при решении прикладных задач.

Одна из них — многомерность или многокритериальность проблемы — наличие нескольких функций цели Y , интересующих исследователя. В интерполяционных задачах эта трудность не принципиальна и, как правило, требует увеличения затрат кратно числу функций цели. В оптимизационных же задачах формально строгое решение может быть получено лишь для одной оптимизируемой Y .

Известно, например, что решение задачи оптимального по минимуму потерь (Y' — потери) проектирования (X — конструктивные параметры) электрической машины с заданными номинальными параметрами (Z — мощность, напряжение, скорость) X'_{opt} выглядит по-иному, нежели решение X''_{opt} для минимума расхода электротехнических материалов Y'' . На практике учет различных критериев оптимальности требует от исследователя компромиссного решения в выборе комплексной функции цели. На построении такой «глобальной» функции цели основано большое число методов, использующих различные алгоритмы обработки субъективных экспертных оценок [7.6].

Другая трудность, с которой может столкнуться исследователь — многофакторность задачи. Чтобы выявить и оценить влияние всех факторов X на Y , необходимо каждый X_i ($i = 1 \dots n$ — номер фактора) варьировать на k уровнях ($k > 1$). При этом с ростом n резко увеличивается число опытов, необходимое для получения зависимости $Y = f(X)$ или оптимизации Y , а их максимальное число равно $N = k^n$. Естественно стремление исследователя сократить число варьируемых факторов, не жертвуя общностью получаемого результата. Добиваются этого путем рационального выбора факто-

ров или их комбинаций. Здесь проявляется искусство исследователя, примеры демонстрации которого приведены в [7.8]. Мошным средством сокращения числа факторов путем приведения модели к безразмерному виду является анализ размерностей.

Третьей особенностью является воздействие на Y случайных факторов группы W . Количественная оценка такого воздействия требует дублирования опытов при фиксированных X (увеличение затрат на эксперимент) и использования аппарата математической статистики для обработки результатов. В ряде случаев на практике влияние W на Y соизмеримо с влиянием некоторых факторов группы X . Методы дисперсионного анализа, случайного баланса позволяют ответить на вопрос, какие из X без ущерба для точности результата можно причислить к случайным, ослабив тем самым гнет многофакторности.

Следующий шаг — разработка плана эксперимента. Под планом понимается задаваемый исследователем ряд совокупностей значений факторов X , при которых производится измерение Y . Этот этап предполагает решение двух задач:

выбор типа модели объекта, т.е. вида функции $Y = f(X)$, параметры которой необходимо найти, что и является формальной задачей анализа результатов эксперимента;

выбор плана, оптимальным образом соответствующего типу модели и требованиям исследователя относительно количества опытов, точности оценки параметров модели, ее предсказательных свойств и т.п.

Первая задача носит неформальный характер, в ее решении может сыграть роль наличие у исследователя априорной информации об объекте, его интуиция, советы экспертов и т.п. Для решения второй задачи имеется богатый арсенал методов оптимального планирования эксперимента [7.3], ряд из которых описан в данном разделе. где, кроме того, систематически излагаются вопросы разработки, построения, функционирования экспериментального комплекса и управления им. К удовольствию начинающего исследователя следует отметить, что многие электротехнические задачи могут быть решены с использованием простых моделей и приемов планирования, несложного лабораторного оборудования и небольшого числа опытов, что однако не исключает творчески и тщательно проведенного этапа постановки задачи.

Развитие науки и техники приводит, с одной стороны, к постоянному усложнению структуры объектов эксперимента и выполняемых ими функций, а с другой стороны, дает экспериментатору мощные средства получения и обработки информации, позволяющие глубже проникнуть в существо изучаемых объектов и процессов. В результате резко усложняются экспериментальные комплексы, увеличиваются потоки первичной информации, расширяются связи объекта с внешней средой, в том числе не поддающиеся управлению, а иногда и контролю, возрастает необходимость учета влияния воздействий на объект внешней среды (в том

числе и самого экспериментального комплекса), растут требования к динамическому диапазону, точности и быстродействию измерительной аппаратуры.

7.2. СИНТЕЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Экспериментальный комплекс (ЭК) — это организационно-техническая система, предназначенная для получения, обработки и отображения информации — результатов экспериментального исследования объекта. В состав ЭК и исходных данных для его построения входят:

1) объект исследования вместе с частью его естественной среды, т. е. со всеми необходимыми для поддержания его существования и функционирования системами;

2) источники стабилизирующих и стимулирующих воздействий, позволяющие создавать режимы объекта, предусмотренные проверяемой гипотезой;

3) приемники информации, в том числе измерительные преобразователи, измерительные приборы, обеспечивающие сравнение с мерой, средства обработки результатов измерений;

4) система управления, координирующая по функциям и синхронизирующая во времени режимы объекта, источников стимулирующих воздействий и приемников информации;

5) программа эксперимента, представляющая, по существу, «перевод» проверяемой гипотезы в термины, определяющие режимы составляющих ЭК и представляющие весь эксперимент как последовательность отдельных этапов (элементарных экспериментов);

6) экспериментатор как интеллектуальная личность или группа экспериментаторов, оценивающие и корректирующие ход эксперимента.

Обязательное наличие экспериментатора является принципиальным моментом, отличающим ЭК от различных измерительных систем. С точки зрения системного анализа ЭК является появление дополнительного по сравнению с измерительной системой контура обратной связи, замыкающегося через экспериментатора и не поддающегося предварительному формальному описанию.

На практике обычно экспериментатор кроме анализа результатов выполняет значительную часть функций других компонент ЭК: поддерживает существование режима объекта, обеспечивает выдачу части стимулирующих воздействий, обрабатывает результаты измерений, управляет ЭК и в реальном масштабе времени генерирует детальную программу эксперимента.

Исходными данными для построения ЭК являются:

1. Описание объекта, его модель, включающая в себя теоретическое представление о процессах, происходящих в объекте, технические данные, количественно уточняющие теоретическое описание или дополняющие его неучтенными деталями,

сведения о доступности объекта для эксперимента, располагаемом времени и диапазоне допустимых воздействий.

2. Проверяемая гипотеза, сформулированная в связи и в соответствии с описанием объекта. Гипотеза может быть тривиальной, например, сводиться к утверждению о существовании параметра, находящегося в заданном поле допуска, или может предполагать сложные качественные особенности поведения объекта. Все предусмотренные гипотезой воздействия и реакции должны исходить из описания объекта.

3. Ограничения на средства эксперимента: на средства измерения и средства обработки информации.

Основной задачей синтеза ЭК является согласование исходных данных, затем следует построение ЭК и проведение эксперимента. При согласовании исходных данных ЭК должны быть обеспечены:

1) соответствие исходных посылок проверяемой гипотезы и описания объекта, допустимость требуемых режимов и их реализуемость при имеющихся ресурсах, отсутствие в объекте эффектов, имитирующих ожидаемые результаты независимо от справедливости гипотезы;

2) соответствие проверяемой гипотезы ограничениям на средства эксперимента. Несоответствия могут возникать в связи с невозможностью задать стимулирующие воздействия требуемого вида или преобразовать наблюдаемую электрическую величину в форму, пригодную для последующей обработки информации с необходимой точностью, разрешающей способностью или быстродействием;

3) соответствие описания объекта исследования и ограничений на средства эксперимента при возможности функционального и физического сопряжения выходов источников стимулирующего воздействия и измерительных устройств с соответствующими элементами объекта без искажения его режима.

Согласование исходных данных — типичный процесс поиска оптимума, целью которого является возможно полная проверка гипотезы при минимальных затратах выделенных ресурсов.

Алгоритм процесса согласования исходных данных ЭК (рис. 7.2) включает в себя модельное мысленное построение структуры ЭК и оценку возможностей данной структуры при достижении поставленной цели.

При приемлемых ожидаемых результатах следует переход к реализации ЭК, при неприемлемых результатах или неполноте ожидаемой информации о справедливости проверяемой гипотезы — переход к анализу следующей возможной структуры. Если в пределах заданных исходных данных переход к следующей структуре невозможен, должно вноситься изменение в исходные данные. Такой алгоритм характерен для любой разработки какой-либо системы и в ходе НИОКР реализуется на этапе составления и согласования технического задания.

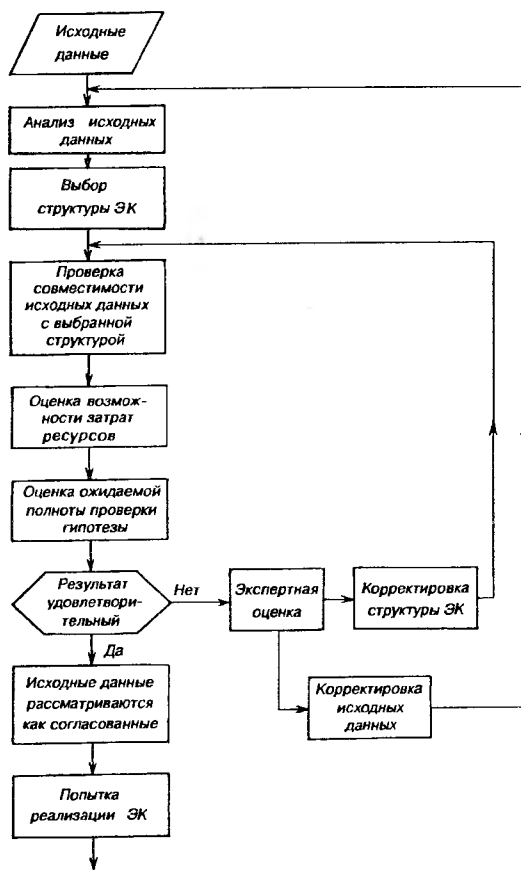


Рис. 7.2. Алгоритм процесса согласования исходных данных ЭК

ВЫБОР СТРУКТУРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Простейшая структура ЭК соответствует наблюдательному эксперименту.

Наблюдательный эксперимент имеет место, когда в составе ЭК отсутствуют источники стимулирующих воздействий, как самостоятельный компонент ЭК. Предполагается, что множество состояний объекта и среды его функционирования содержит режимы, рассматриваемые как исходные для проверяемой гипотезы, и эти режимы реализуются с достаточно высокой вероятностью. Средства измерения и средства обработки информации должны обеспечить опознавание таких режимов, накопление информации о них, обработку этой информации и представление ее оператору в виде, предусмотренном программой эксперимента (рис. 7.3).

Для проверки совместимости исходных данных с простейшей структурой ЭК следует рассмотреть:

1) возможность возникновения при нормальном функционировании объекта необходимых для проверки гипотезы режимов или последовательностей режимов;

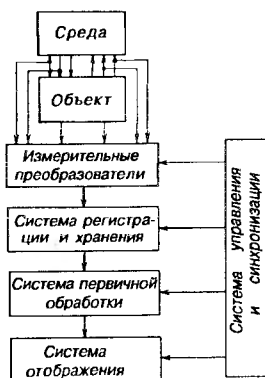


Рис. 7.3. Структура экспериментального комплекса для наблюдательного эксперимента

2) необходимое потребное время наблюдения, объем подлежащей обработке информации, требования к быстродействию средств измерения и обработки информации;

3) допустимость искажений режимов при подключении измерительной аппаратуры к требуемым точкам объекта и сопрягаемым с ним внешним устройствам.

При рассмотрении первого и третьего пунктов следует учитывать, что любая практически значимая гипотеза подразумевает существование бесконечного множества режимов, в которых она справедлива и может быть подтверждена только на бесконечном материале. Факт неполного охвата в наблюдательном эксперименте области действия проверяемой гипотезы сам по себе не является основанием для отбраковки рассматриваемой структуры ЭК.

Для проверки совместимости описания объекта и проверяемой гипотезы в рамках данной структуры ЭК необходимо на основе априорной информации оценить значимость режимов для достаточно полного подтверждения гипотезы, возможную достоверность (погрешность) результатов отдельных измерений, зависимость результатов элементарных экспериментов в смежных режимах. При наличии таких сведений может быть поставлена задача вычисления апостериорной вероятности справедливости проверяемой гипотезы по результатам любого опробованного сочетания режимов и определению сочетаний режимов, опробование которых может подтвердить данную гипотезу с требуемой достоверностью [7.10, 7.11].

Оценку потребного времени эксперимента и средств измерений необходимо проводить согласно предполагаемой программе эксперимента. Здесь могут рассматриваться следующие основные варианты:

1. Непрерывное измерение и запоминание значений всех переменных, которые необходимо учитывать в данном эксперименте, последующее выделение интервалов, соответствующих режимам, подлежащим опробованию, и обработка данных, относящихся к этим интервалам.

В этом случае весь тракт измерения и запоминания должен обладать достаточным быстродействием и максимальным динамическим диапазоном, требуется максимальный объем памяти. Необходимый интервал наблюдения, содержащий требуемый набор заданных режимов, в зависимости от закона следования режимов объекта можно определить точно или с заданной достоверностью. Средства обработки информации выбираются независимо от физических параметров объекта и измерительной аппаратуры. Требования к быстродействию средств обработки определяются допустимой задержкой результата эксперимента относительно интервала наблюдения. Накапливаемая в памяти информация в значительной степени избыточна, но она может оказаться полезной, если по результатам анализа потребуется изменить программу обработки данных.

2. Если описание объекта позволяет по значениям каких-либо переменных предварительно опознавать появление режима, подлежащего проверке, требования к измерительной и записывающей аппаратуре могут быть снижены, т.е.:

вводится предварительная настройка измерительных приборов на параметры конкретного режима, что облегчает требования к их динамическому диапазону;

устраняется избыточность запоминаемой информации, т.е. уменьшается требуемый объем памяти;

параметры режима или их часть могут вообще не измеряться, достаточно фиксировать лишь индекс режима, что упрощает измерительную аппаратуру и дополнительно уменьшает используемый объем памяти.

Из функций средств обработки информации исключается простая, но громоздкая функция просмотра накопленного материала и выделения заданных режимов. Для предварительного опознавания режима может потребоваться быстродействующий анализатор, если только признак режима не формируется в объекте с достаточным опережением. Система управления измерительными приборами должна достаточно быстро выдавать команды на установление оптимальных для данного режима измерительных приборов, а измерительные приборы успеть принять и выполнить эти команды.

Существенным недостатком чисто наблюдательной структуры ЭК, затрудняющим согласование исходных требований, часто оказываются резко завышенные требования к точности и разрешающей способности измерительной аппаратуры и детальности описания объекта.

Во многих случаях подлежащий исследованию процесс протекает на фоне многочисленных, иногда значительно более мощных процессов объекта. При этом связи между переменными в объекте могут быть весьма сложны. В этом случае даже относительно простое утверждение гипотезы может для переменных объекта превратиться в сложное интегродифференциальное уравнение, исходные данные для решения которого получаются при измерении со значительными погрешностями, а коэффициенты известны из модели объекта весьма приближенно.

Чисто наблюдательная структура ЭК может

быть применена лишь для исследования процессов, имеющих какие-либо явные отличительные признаки во временных, амплитудных или частотных характеристиках, позволяющих достаточно просто обеспечить выделение сигналов на уровне помех измерительных преобразователей.

Исследование объекта в автономном режиме. В этом случае объект полностью изолируется от реальной системы и все стимулирующие воздействия создаются специальной системой экспериментального комплекса (рис. 7.4). Такое построение ЭК приводит к изъятию объекта из эксплуатации и к необходимости создания достаточно сложного устройства, имитирующего с требуемой степенью точности реальную систему, с которой должен взаимодействовать объект, что всегда ведет к экономическим затратам.

Основанием для такого варианта исследования могут быть:

отсутствие реальной системы на момент исследования объекта;

необходимость проведения эксперимента до установки объекта в реальную систему в связи с невозможностью предсказать отдельные детали их взаимодействия;

недоступность объекта для исследования после установки его в реальную систему;

невозможность создания требуемых режимов объекта в реальной системе из-за неуправляемости или ограниченной управляемости отдельных параметров системы;

невозможность создания требуемых режимов объекта в реальной системе из-за резкого отклонения системы в целом от оптимального режима, приводящего к значительным экономическим затратам;

недопустимость создания требуемых режимов объекта в реальной системе из-за возможных опасных последствий;

невозможность в составе реальной системы реализовать достаточно малый уровень шумов наводок и помех, что не позволяет получить требуемую точность результатов измерений.

В автономном режиме появляется возможность

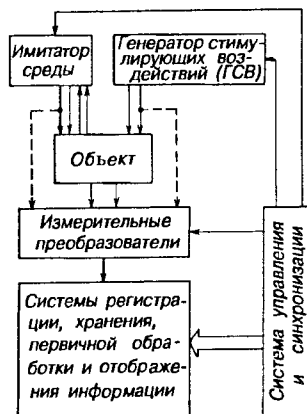


Рис. 7.4. Структура экспериментального комплекса для автономного эксперимента

резко сократить время эксперимента, уменьшить трудовые и материальные затраты на построение и обслуживание измерительного комплекса и систем обработки результатов измерений.

Следует учитывать, что дополнительные расходы на создание источников стимулирующих воздействий могут быть резко снижены, если ЭК строится на основе испытательных установок, предназначенных для производственных испытаний объектов исследования.

Программы эксперимента и структура ЭК строятся при этом в следующих вариантах:

1. Полная имитация реального режима. В этом случае достигается управляемость всех переменных объекта, стабилизация режимов, т.е. уменьшаются случайные погрешности, связанные с неопределенностью режима объекта, обеспечивается наиболее рациональная последовательность режимов, позволяющая с минимальными затратами времени опробовать наиболее информативные режимы.

2. Осуществление режима, близкого к реальному, в расширенных диапазонах переменных объекта.

3. Создание искусственного режима, имеющего качественные отличительные черты по объекту в целом. Например, периодизация режима, создание стимулирующих сигналов специальной формы или специфического спектрального состава.

В первом и втором случаях достигается более благоприятное соотношение помех и полезных сигналов. Однако вывод объекта за пределы нормальных рабочих режимов может привести к ошибочным выводам, если не учитывать возможных качественных изменений внутри объектовых связей.

Декомпозиция объекта. В данном случае объект либо физически расчленяется на отдельные части, либо отдельные части объекта исследуются порознь в составе объекта, при этом режим объекта в целом существенно отличается от реального (рис. 7.5).

Внешне построение ЭК в этом случае мало отличается от рассмотренных выше, однако суть

эксперимента резко усложняется. Декомпозиция объекта не изменяет исходной ситуации, а именно того, что проверяемая гипотеза была сформулирована по отношению к объекту в целом. Поэтому, если ранее задачей эксперимента являлось подтверждение гипотезы, то после декомпозиции объекта добавилась задача подтверждения допустимости декомпозиции.

Комбинированные структуры. В большинстве случаев структуры, перечисленные выше, реализуются в некотором сочетании между собой. Типичным путем формирования структуры ЭК является неполная изоляция объекта исследования от его естественной среды. Рассмотрим варианты комбинированных структур:

1. Наложение стимулирующего воздействия на рабочий режим объекта. При этом почти полностью сохраняются связи объекта с системой, его режим. Для проведения эксперимента создаются или выбираются источники стимулирующих воздействий, приемники информации и средства ее обработки, система управления, обеспечивающая аддитивное или мультипликативное введение стимулирующих воздействий в существующие связи и отбор информации без нарушения связей объекта с системой (рис. 7.6). Такой вариант может быть очень экономичным, но имеет и отрицательные стороны:

в законченной конструкции ЭК введение стимулирующих воздействий и вывод сигналов могут быть затруднены;

на диапазон и характер стимулирующих воздействий обычно накладываются жесткие ограничения во избежание резкого ухудшения эксплуатационных показателей системы;

обратные связи в системе могут реагировать на введение стимулирующих воздействий, т.е. отклик может определяться не только и даже не столько самим объектом, но совокупно объектом и внешней для него системой;

могут возникать трудности при разделении

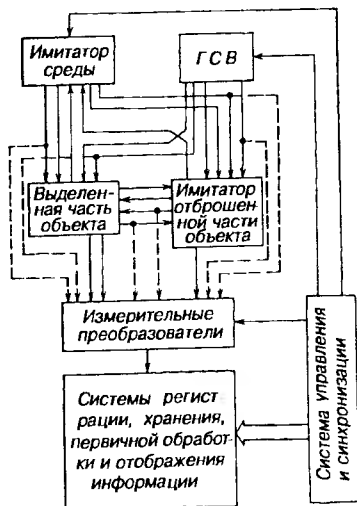


Рис. 7.5. Структура экспериментального комплекса при декомпозиции объекта

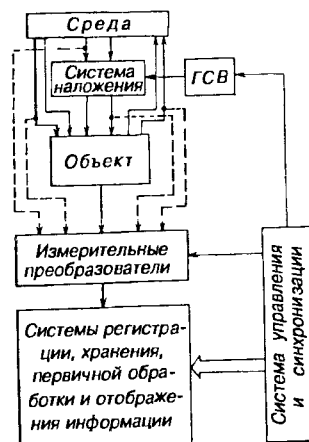


Рис. 7.6. Структура экспериментального комплекса при наложении стимулирующих воздействий

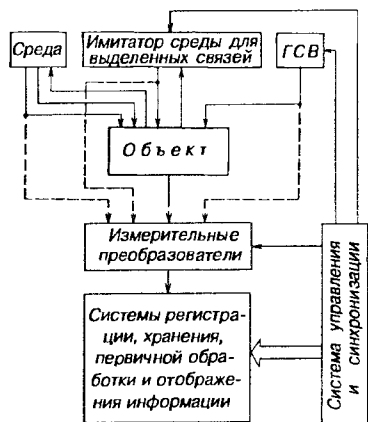


Рис. 7.7. Структура экспериментального комплекса при неполной изоляции объекта



Рис. 7.8. Структура экспериментального комплекса при неполной декомпозиции объекта

отклика объекта на составляющие, соответствующие нормальному его режиму, и составляющие, вызванные стимулирующими воздействиями.

2. Неполная изоляция объекта от системы. При этом, как правило, сохраняются основные связи, обеспечивающие функционирование объекта, требующие наибольших затрат энергии и трудоемкие в моделировании. Под управление собственных средств экспериментального комплекса передается часть внешних связей объекта, достаточная для задания режимов в требуемых диапазонах (рис. 7.7). Такой вариант также позволяет экономить значительные средства и время за счет использования имеющихся эксплуатационных или испытательных систем поддержания рабочего состояния объекта.

3. Неполная декомпозиция объекта. При этом в объект вносятся изменения, не влияющие или мало влияющие на достоверность эксперимента, но допускающие расширение или изменение диапазона возможных стимулирующих воздействий (рис. 7.8).

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Целью оптимизации ЭК является обеспечение наибольшей достоверности вывода о проверяемой гипотезе при наименьших затратах на проведение эксперимента. Такой формулировкой из-за абстрактности невозможно ограничиться в конкретном случае, но она обязательно должна постоянно учитываться при синтезе ЭК. Конкретизация целевой функции в экспериментальном исследовании принципиально затруднена, поскольку, во-первых, при исследовании неизвестных явлений заведомо отсутствуют объективные оценки стоимости получаемой информации; во-вторых, весьма сложно оценить затраты на создание оригинальных узлов ЭК и особенно затраты времени и выигрыш, достигаемый при сокращении времени проверки гипотезы.

Следует отметить, что выяснение вышеуказанных вопросов может до неприемлемого уровня

увеличить затраты на собственно формирование целевой функции (особенно затраты времени).

Несмотря на объективные трудности, формирование целевой функции при оптимизации ЭК должно проводиться обязательно во избежание грубых ошибок, которые в современном техническом эксперименте могут привести к невосполнимым потерям.

Наиболее приемлем метод экспертных оценок, причем должны учитываться:

- достоверность проверки справедливости проверяемой гипотезы, достаточная для внедрения выводов проверяемой гипотезы в практику;

- ограничения достижимого уровня достоверности проверки в связи с ограниченностью исходных данных;

- возможный выигрыш от внедрения выводов проверяемой гипотезы в практику, в том числе появление новых технических возможностей, качественно отличающихся от ранее имевшихся;

- затраты на изготовление или отвлечение из эксплуатационного процесса объекта исследования и связанных с ним систем;

- затраты на создание экспериментального комплекса, в том числе на разработку и изготовление оригинальных узлов;

- затраты на проверку и калибровку экспериментального комплекса;

- затраты на непосредственное проведение эксперимента с учетом времени, потребного для обработки и оценки результатов;

- расширение фронта научных и инженерных работ или закрытие неперспективных направлений в результате проведения эксперимента;

- возможные вторичные эффекты, связанные с применением создаваемого ЭК для родственных задач независимо от результатов проверки конкретной гипотезы;

- наличие конкурирующих направлений исследования, решающих аналогичные технические задачи.

7.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НАБЛЮДАЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ИЗМЕРЯЕМУЮ

Существующее множество разновидностей измерительных преобразователей, применяемых в технике [7.12, 7.13], многие эффекты, известные и используемые в экспериментальной физике, позволяют утверждать, что обеспечение эксперимента преобразователями сигнала не вносит принципиальных ограничений, а затруднения определяются недостатком информации или установленными пределами затрат на эксперимент. Однако на практике выбор преобразователей сигналов в измерительном тракте зачастую является одной из центральных проблем при построении ЭК, удачное разрешение которой в значительной степени определяет дальнейшую подготовку и ход эксперимента.

Объективной причиной, придающей такое значение выбору преобразователей сигналов, является несоответствие имеющегося описания объекта исследования номинальным возможностям средств измерения и ограниченное соответствие номинальных свойств средств измерения их реальным свойствам. Существующие методы анализа, описания и моделирования реальных объектов основаны на декомпозиции процессов, расчленении их на отдельные составляющие, описываемые порознь. Анализ эффектов, положенных в основу рабочего процесса измерительных преобразователей, также проводится для идеализированных условий, номинальное описание реальных преобразователей опирается на их параметры, получаемые в строго определенных испытательных и поверочных ситуациях.

В то же время, в объекте исследования все процессы существуют как неразрывное целое. Во многих случаях отсутствуют сколько-нибудь объективные основания для выделения в реальном наблюдаемом физическом процессе различных составляющих (постоянных, переменных, периодических, гармонических, нормальных к поверхности и т.п.). Любой измерительный преобразователь реагирует на процесс, усредненный в некотором объеме и интервале времени, границы которых могут быть весьма неопределенны.

Только при проведении простейших по цели экспериментов (хотя по реализации они могут быть весьма громоздкими и сложными), направленных на уточнение описания хорошо изученных объектов, оказывается возможным при выборе преобразователей сигналов ограничиться анализом их метрологических характеристик на предмет обеспечения заданной точности. В большинстве случаев экспериментатор должен на основе имеющейся априорной информации установить применимую для данного случая интерпретацию связи характеристик физического процесса (сигнала), воздействующего на преобразователь, и некоторого его выходного параметра. При этом должны учитываться особенности описания процесса преобразования в пространстве и во времени. В обоих случаях значительный эффект с точки зрения

упрощения математической обработки и наглядности результатов может дать переход от реальных, существующих в пространстве и времени величин к их изображениям, например, в виде частотных спектров. В указанном смысле анализ рабочего процесса измерительных преобразователей является задачей анализа фильтра [7.14, 7.15].

Различные методы фильтрации применяются в ЭК и на этапе обработки результатов измерения, причем тогда одной из задач фильтрации является компенсация фильтрующих свойств измерительных преобразователей. На этапе обработки результатов измерения применяются разнообразные математические методы, приводящие в сложных случаях к построению алгоритмов фильтрации, требующих большого объема вычислений и введения в ЭК мощных ЭВМ.

При анализе измерительных преобразователей обычно можно ограничиться рассмотрением простейших случаев фильтрации. Если связь между характеристиками наблюдаемого процесса и выходной величиной преобразователя усложняется, его использование нежелательно. В большинстве случаев предпочтительнее значительно (вплоть до порядка) увеличить число преобразователей и соответственно объем обрабатываемой информации, нежели использовать один преобразователь со сложной передаточной характеристикой, так как учет влияния такой сложной характеристики требует резкого увеличения числа измерений и сопоставления показаний в отдельных режимах.

Для измерительных преобразователей характерными являются операции усреднения, выделения или подавления частотных составляющих, перенос или трансформация спектра, дискретизация. Применительно к этим операциям определяются номинальные характеристики преобразователей.

УСРЕДНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Усреднение во времени связано с инерционностью любого процесса и наложением откликов на одновременные воздействия. В простейшем приближении линейного описания в преобразователе выходная величина y связана с входной величиной x соотношением

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) g(t - \tau) dt.$$

Наблюдаемое значение $y(t)$ является суммой прошедших значений $x(\tau)$ с весовой функцией $g(t - \tau)$. Если $g(t)$ приближается к виду $g(t) = 1$ при $0 < t < T$ и $g(t) = 0$ при $t \geq T$ можно говорить об усреднении значения $x(t)$ на интервале длительностью T .

При постановке эксперимента встречаются следующие подходы к интерпретации такой связи.

1. Функция $g(t)$ формируется специально или нормируется с требуемой точностью и учитывается при обработке результатов.

2. Функция $g(t)$ специально не формируется и учитывается через параметр — время установления преобразователя $t_{уст}$. Оценка получаемого резуль-

тата зависит от вида аппроксимации $g(t)$, уровня отсчета времени установления и характера изменения $x(t)$ за этот интервал времени. Так, если $g(t)$ приближается к экспоненте, время установления отсчитывается по уровню 0,9, а $x(t)$ мало изменяется на интервале $t_{уст}$, $y(t)$ можно рассматривать как усредненное значение на интервале $0,4 t_{уст}$.

3. Функция $g(t)$ вообще не учитывается. Такой подход весьма распространен. Он предельно упрощает дальнейшую обработку результатов, но требует применения измерительных преобразователей с очень малым временем установления, значительно меньшим, чем время существенного изменения измеряемой величины. Для проведения эксперимента в отсутствие развитых средств обработки сигнала такой подход неизбежен, но при наличии развитой системы обработки результата эксперимента ужесточение требований к измерительным преобразователям нельзя считать оправданным и следует пользоваться вариантом 1.

При пространственном усреднении определить весовую функцию при значениях измеряемого параметра во всех точках рабочего пространства измерительного преобразователя весьма сложно. Кроме того, даже если весовая функция определена, для получения реального распределения измеряемой величины необходимо обобщить показания измерительного преобразователя при множестве положений в пространстве. Если при временном усреднении такое сканирование множества временных отсчетов происходит естественным путем в течение некоторого времени, то в пространстве необходимо организовать перемещение измерительного преобразователя, причем за время, пока картина поля измеряемой величины не изменилась. В большинстве случаев от этого отказываются и рассматривают результат преобразования как среднее значение измеряемой величины в некотором объеме, определяемом размерами преобразователя.

ЧАСТОТНАЯ СЕЛЕКЦИЯ

Выделение частотных составляющих переменных, зависящих от времени, и их подавление можно рассматривать как случай, когда $g(t)$ приближается к виду $g(t) = e^{-at} \sin bt$, причем $a \leq b$. Частотная избирательность преобразователя может вытекать из его физической природы или же может вводиться специально. Применяя схемы со многими накопителями энергии, нелинейные элементы, элементы с управляемыми параметрами, можно формировать требуемые частотные характеристики. С точки зрения построения ЭК представляют интерес следующие возможности:

избирательное пропускание сигнала, если его частотные составляющие, необходимые для проведения эксперимента, сосредоточены в диапазоне (или нескольких диапазонах), относительно свободном от воздействия помех;

избирательное подавление помех, если их частотные составляющие сосредоточены в диапазоне или нескольких диапазонах, не перекрывающем

необходимых для эксперимента частотных составляющих сигнала.

В этих случаях фильтрующие цепи следующих типов применяются по отдельности или в совокупности [7.14, 7.15]:

1) пропускающие фильтры (НЧ, ВЧ или полосовые), выделяющие значимую часть спектра сигнала;

2) перестраиваемые пропускающие фильтры, параметры которых меняются по сигналу управления при изменении режимов объекта в соответствии с прогнозируемым изменением спектра сигнала;

3) следящие пропускающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на достаточно мощные частотные составляющие сигнала при условии, что в данном диапазоне мощность составляющих сигнала значительно превосходит мощность шумов и помех;

4) следящие пропускающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на частоту опорного сигнала, поступающего от генераторов стимулирующих воздействий, при условии, что частотный спектр измеряемого сигнала достаточно полно определяется генератором стимулирующих воздействий;

5) заграждающие фильтры (НЧ, ВЧ или полосовые), уменьшающие коэффициент передачи тракта в диапазонах, где частотные составляющие сигнала имеют мощность, значительно меньшую мощности шумов и помех;

6) заграждающие фильтры, перестраиваемые по сигналу управления, в соответствии с ожидаемым изменением диапазона действия помех;

7) следящие заграждающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на достаточно мощные частотные составляющие помехи;

8) следящие заграждающие фильтры, непрерывно настраивающиеся на частоту опорного сигнала, подаваемого от источника помехи в объекте исследования или в системе задания режима.

Наилучшие результаты выделения сигналов могут быть получены при оптимальном сочетании всех перечисленных типов фильтров. При этом надо учитывать, что в большинстве случаев фильтры типов 4 и 8 обеспечивают наиболее полное выделение сигналов. В ряде случаев, когда задание опорных сигналов по каким-то техническим причинам затруднено, а спектральные составляющие сигнала и помехи достаточно обособлены, предпочтительнее оказывается применение типов 3 и 7. Поскольку следящие фильтрующие устройства строятся на элементах с управляемыми параметрами, их динамический диапазон часто существенно ограничен и между ними и измерительным преобразователем желательно включать фильтры типов 1, 2 и 5, 6. Фильтры типов 1, 5 проще в реализации, но отсутствие перестройки по частоте может существенно ограничить возможности ЭК.

ПЕРЕНОС ИЛИ ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА

Перенос спектра, реализуемый при умножении переменной на гармонический опорный сигнал, или трансформация спектра повторяющегося процесса при умножении переменной на опорную последовательность импульсных сигналов (стробоскопическое преобразование) является исключи-

тельно мощным средством, позволяющим упростить решение многих задач, а иногда получить единственное реализуемое решение. В то же время самостоятельного значения эта операция не имеет — смысл ее в согласовании частотных характеристик измерительного тракта и частотного спектра измеряемой величины. Перенос или трансформация спектра является основой построения следящих фильтрующих устройств и в этом применении должны рассматриваться при синтезе ЭК.

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ НАБЛЮДАЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

Дискретизация значений результатов эксперимента на каком-то этапе обработки производится во всех случаях (при их окончательной регистрации и интерпретации — обязательно). Введение дискретизации значений наблюдаемых переменных на ранних этапах обработки сигнала, особенно в измерительном тракте, само по себе не вносит принципиальных изменений в ход эксперимента. Поэтому применение дискретизации значений измеряемой величины, внедрение цифровых и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) должно находить обоснование за счет выигрыша на последующих этапах обработки данных. В общем случае представления результатов на выходе измерительного преобразователя ЭК могут быть:

1) исключение появления и накопления дополнительных погрешностей при передаче, хранении и обработке сигнала. Следует отметить, что некоторая вероятность появления погрешностей всегда остается, причем могут возникать погрешности, несравнимо более грубые, чем при аналоговой обработке сигнала. Существенное снижение этой вероятности всегда достигается ценой уменьшения пропускной способности канала связи, информационной емкости накопителя, замедления вычислительной обработки за счет введения контрольных операций и увеличения разрядности операндов;

2) резкое расширение арсенала методов обработки информации в связи с возможностью использования ЭВМ. Большинство эффективных алгоритмов обработки информации в настоящее время могут быть реализованы в цифровом вычислительном устройстве. Следует отметить, что при прочих равных условиях скорость обработки информации по сравнению с аналоговыми методами в конкретных простых преобразованиях всегда уменьшается, но с учетом возможности параллельной обработки проигрыш в скорости выполнения элементарных преобразований может быть компенсирован;

3) резкое упрощение адаптации ЭК к изменениям условий эксперимента, возможность использования ЭК для широкого диапазона задач. В системах аналоговой обработки сигнала в связи с влиянием многочисленных паразитных параметров элементов на погрешность результата получить высокую точность и скорость обработки и, в особенности, реализовать сколько-нибудь сложные

нелинейные операции удается только в специальных вычислителях.

Цифровые измерительные преобразователи характеризуются дискретностью отсчетов по времени и по уровню преобразуемой величины. Дискретизация во времени определяется двумя параметрами:

1) минимальным интервалом между отсчетами или минимальным разрешенным сдвигом фазы момента отсчета;

2) интервалом усреднения измеряемой величины.

Минимальный интервал между отсчетами характеризует возможность применения измерительного преобразователя для анализа быстропротекающих однократных процессов и полностью определяется быстродействием элементов преобразователя.

Минимальный разрешенный сдвиг фазы момента отсчета характеризует возможность применения преобразователя для анализа высокочастотных повторяющихся процессов. Сдвиг фазы при этом задается обычно внешним по отношению к преобразователю устройством. Минимальный разрешенный сдвиг фазы определяется нестабильностью момента отсчета преобразователя. Практически в режиме стробирования повторяющихся процессов дискретизация по времени уменьшается до уровня фазовых шумов системы синхронизации, т.е. дискретный преобразователь имеет в этом случае то же разрешение во времени, что и аналоговый.

Интервал усреднения измеряемой величины в явном виде задается для интегрирующих АЦП. Для других типов преобразователей интервал усреднения в явном виде обычно не задан. В большинстве случаев интервал усреднения определяется либо временем срабатывания нуля-органа АЦП, либо временем запоминания устройства выборки и хранения, вводимого во входную цепь АЦП. Интервал усреднения может быть снижен до уровня минимального времени установления строб-преобразователей, т.е. до нескольких десятков пикосекунд.

Дискретизация по уровню преобразуемой величины при измерении постоянного напряжения однозначно ограничивает чувствительность преобразователя к малым изменениям измеряемой величины, что позволяет рассматривать значение кванта как одну из характеристик точности измерения.

Следует, однако, учитывать, что при измерении величин, имеющих шумовую составляющую, превышающую шаг квантования, с последующей статистической обработкой результатов влияние квантования на точность и разрешающую способность ЭК в целом исчезает, шум как бы размывает уровни квантования и с помощью АЦП можно обнаруживать и точно измерять приращения сигнала, значительно меньшие шага квантования.

7.4. СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ЭКСПЕРИМЕНТА

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОБЪЕКТА И АППАРАТУРЫ

Синтез алгоритма эксперимента происходит в процессе создания ЭК путем последовательных приближений. При существенных изменениях задачи ЭК происходят изменения как в алгоритме

эксперимента, так и в составе и конфигурации ЭК. Однако в небольших пределах алгоритм должен иметь возможность адаптироваться к изменениям без перестройки ЭК. В ходе эксперимента должны быть проведены:

реализация всех необходимых режимов объекта исследования, причем для повышения достоверности результатов может потребоваться многократное повторение всех или части режимов или, если полное повторение невозможно, многократная реализация близких режимов, которые с точки зрения проверяемой гипотезы идентичны в пределах допуска;

фиксация, измерение и обработка значений наблюдаемых величин, причем часть результатов обработки может быть необходима для определения дальнейшего хода эксперимента, т.е. эта часть обработки данных должна выполняться с максимальной скоростью и, если необходимо, отдельно от остальных операций обработки данных;

выдача команд на продолжение эксперимента в зависимости от результата, полученного на предыдущих этапах, причем часть команд может формироваться с привлечением оператора;

оформление результатов по заданной форме, которая может корректироваться в ходе эксперимента.

Информация от объекта поступает в аппаратуру обработки результатов наблюдений, обрабатывается и регистрируется как конечный результат эксперимента или используется для определения дальнейшего развития эксперимента. В простейшем случае определяются новые режимы наблюдения, в более сложном случае может существенно меняться вся последовательность операций, т.е. происходит переход на другую ветвь разветвленного алгоритма. Наконец, может формироваться новая ветвь алгоритма взаимодействия ЭК с объектом. В последнем случае в ЭК может быть предусмотрена специальная программа, непосредственно не участвующая в обработке информации, но предназначенная для адаптации алгоритма взаимодействия ЭК с объектом. Если априорной информации недостаточно для составления такой программы, то адаптация алгоритма функционирования ЭК к новому этапу эксперимента производится экспериментатором.

В целом алгоритм эксперимента определяется конкретной задачей, но отдельные его блоки, особенно математической обработки результатов наблюдений, являются весьма стабильными, программы для выполнения такой обработки входят в прикладное математическое обеспечение большинства вычислительных систем.

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА ИЗ ПОМЕХ

Выделение сигнала на фоне помех является наиболее типичным случаем обработки результатов наблюдений. Основным процессом является выделение сигнала известной формы на фоне случайной помехи. В более сложных вариантах форма сигнала неизвестна, но известна форма его составляющих. При наличии детерминированной помехи аналогичные методы предварительно применяются

для выделения помехи, которая затем вычитается из наблюдаемой переменной.

В простейшем случае, когда для некоторого множества N значений x_i наблюдаемой величины можно предположить постоянное значение S сигнальной составляющей, выделение сигнала достигается усреднением полученных значений наблюдаемой величины [7.10, 7.11]

$$S = (1/N) \sum_{i=1}^N x_i.$$

При определенных допущениях о характере случайной помехи ее среднее значение является наиболее вероятным для величины сигнала. Отношение сигнал/помеха при вычислении среднего значения увеличивается приблизительно в $\sqrt{N}$ раз, если наблюдения равноточны. При неравноточных наблюдениях вычисляется средневзвешенное значение

$$S = \sum_{i=1}^N x_i p_i / \sum_{i=1}^N p_i,$$

где p_i — вес, определяемый отношением дисперсий отдельных наблюдений. Необходимо отметить, что априорная оценка веса может оказаться сложной проблемой.

Если значение сигнала S нельзя считать постоянным, но есть основания ожидать, что зависимость $S(i)$ подчиняется некоторому закону $\Psi(i)$ и отличается от него лишь постоянным множителем A , можно воспользоваться той же формулой усреднения. В предположении равноточных наблюдений наиболее вероятное значение A может быть найдено как

$$A = \sum_{i=1}^N x_i \Psi_i / \sum_{i=1}^N \Psi_i^2.$$

Если зависимость $S(i)$ отличается от $\Psi(i)$ не только масштабом, но и смещением m , то определить наиболее вероятные значения A и m можно по ряду значений

$$A_j = \sum_{i=1}^N x_{i-j} \Psi_i / \sum_{i=1}^N \Psi_i^2$$

для всех возможных j . Искомое значение A определится как $\max \{A_j\}$, соответствующее значение j указывает величину смещения m .

Дальнейшее усложнение обработки результатов наблюдений в большинстве случаев является развитием изложенного подхода.

В большинстве случаев высказать обоснованное предположение относительно вида зависимости $\Psi(i)$ оказывается затруднительно. Задача решается представлением зависимости $\Psi(i)$ в виде

$$\Psi(i) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varepsilon_k(i), \text{ где } \varepsilon_k(i) \text{ — ряд функций,}$$

ортогональных на интервале наблюдения. Коэффициенты α_k определяются из формулы для A_j . При анализе сигналов типичным является выбор в качестве ε_k гармонических функций, что приводит

к преобразованию Фурье. Выбор гармонических функций удобен, так как позволяет применить к полученным результатам известные методы анализа электрических систем.

Перечисленные методы обработки сигнала позволяют определять значения переменных, их зависимости от времени и от других переменных, идентифицировать в заданном классе функций характеристики объектов. Усложнение может быть вызвано увеличением размерности задач и привлечением ряда дополнительных допущений о форме искомой зависимости и о статистических характеристиках помех.

Особым случаем является выявление экстремальных режимов объекта, оптимизация его характеристик. Для решения этой задачи используются разнообразные методы поиска экстремума [7.17], методы оптимального планирования отдельных этапов эксперимента [7.19—7.21], обеспечивающие в заданных условиях и принятых допущениях наибольшую точность оценок локальных свойств поверхности отклика.

Следует отметить, что многие алгоритмы обработки результатов наблюдений, особенно при решении задач распознавания образов [7.22, 7.23], анализа изображений и т.п. носят в целом эвристический характер, однако включают в себя в качестве составляющих упомянутые достаточно строгие математические методы.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При исследовании действующих технических систем широкое применение находят методы планирования и анализа эксперимента, позволяющие по результатам специально спланированного эксперимента построить математическую модель системы. Теория планирования и анализа данных эксперимента базируется на ряде исходных допущений.

1. Обычно предполагается, что истинная выходная переменная системы y_0 связана с входными переменными системы $x_1 \dots x_k$ математической зависимостью известного вида, т.е.

$$y_0(x) = f_1(x_1 \dots x_k) C_1 + \dots + f_m(x_1 \dots x_k) C_m = \sum_{j=1}^m C_j f_j(x).$$

Функция $y_0(x)$ является линейной относительно неизвестных параметров C_j и содержит известные базисные функции $f_j(x)$. Она может быть полиномом известной степени, тригонометрическим или экспоненциальным рядом и т.п. Цель состоит в нахождении неизвестных параметров $C_1 \dots C_m$.

2. Предполагается, что в процессе исследования при различных значениях входных переменных $x_{i1}, \dots, x_{ik}$ производится измерение выходной переменной. Матрица $X = \parallel x_{i1} \dots x_{ik} \parallel$, $i = 1 \dots N$, размера $(N \times k)$ называется матрицей планирования или просто планом эксперимента. Эксперимент называется насыщенным, если число

неизвестных параметров m равно числу опытов эксперимента N .

3. Предполагается, что измеренное значение $y(x)$ из-за неизбежной ошибки эксперимента не совпадает с истинным $y_0(x)$.

В зависимости от природы ошибки эксперимента различают:

а) регрессионный эксперимент, когда ошибка случайная с нулевым средним и постоянной дисперсией. Результат регрессионного эксперимента представлен таблицей данных $x_{i1} \dots x_{ik}$, y_i , $i = 1 \dots N$, которая включает результаты N опытов эксперимента;

б) интервальный эксперимент, когда ошибка связана с неопределенностью результата и известна ее абсолютная или относительная величина. Результат интервального эксперимента представлен таблицей данных $x_{i1} \dots x_{ik}$, $[y_i^-; y_i^+]$, $i = 1 \dots N$, где y_i^- , y_i^+ означают верхнюю и нижнюю границы, между которыми находится в i -м опыте неизвестное истинное значение y_{0i} .

Из сравнения видно, что в регрессионном эксперименте измерения выходной переменной представляются числами, а в интервальном эксперименте — интервалами.

Если некоторым образом выбран план эксперимента (матрица X), то можно произвести необходимые измерения (опыты) в соответствии с планом.

В результате регрессионного эксперимента данные обрабатывают методами регрессионного анализа (МРА) [7.19] и находят оценки $\hat{C}_j$ неизвестных параметров. Их точность характеризуется доверительным эллипсоидом Q , который зависит от матрицы плана X , или доверительными интервалами $[C_j^-; C_j^+]$, которые с заданной вероятностью α покрывают неизвестные истинные параметры C_j .

В результате интервального эксперимента данные обрабатывают методом интервального анализа (МИА) [7.20], также находят оценки $\hat{C}_j$, точность которых характеризуется областью (многогранником) Ω , содержащей неизвестные истинные параметры $C_1 \dots C_m$. Вместо многогранника Ω обычно находят интервалы $[C_j^-; C_j^+]$, которые наверняка содержат истинные коэффициенты C_j .

В итоге применения МРА или МИА находят искомую математическую модель

$$y(x) = \hat{C}_1 f_1(x) + \dots + \hat{C}_m f_m(x),$$

причем точность ее коэффициентов задается интервалами: $C_j^- \leq C_j \leq C_j^+$, $j = 1 \dots m$. (Для МРА они накрывают C_j с заданной вероятностью α , а для МИА — наверняка.)

Построение математической модели по данным эксперимента включает следующие этапы.

1. Отбор существенных переменных и определение структуры математической модели. На этом, в настоящее время слабо формализованном, этапе исследования необходимо отобрать по возможности

наименьшее число входных факторов $x_1 \dots x_k$, оказывающих влияние на выходной параметр системы y . Среди отобранных факторов $x_1 \dots x_k$ не должно быть линейно зависящих (в частности, однозначно выражаемых через другие). Кроме того, диапазоны их изменения должны быть достаточно большими, чтобы изменение выходной переменной y_0 при изменении фактора x_i можно было обнаружить на фоне ошибок измерения и помех.

При определении структуры математической модели, т.е. при выборе базисных функций $f_1(x) \dots f_m(x)$, используют различные априорные сведения и теоретические соотношения, справедливые для изучаемой технической системы.

2. Определение оптимального плана эксперимента предполагает выбор матрицы X так, чтобы при заданном числе опытов N обеспечить наибольшую точность оценок.

Чаще всего используют D -оптимальные планы, которые минимизируют объем эллипсоида Q (многогранника Ω), или A -оптимальные планы, которые минимизируют максимальную диагональ эллипсоида Q (многогранника Ω). Если хотят обеспечить наилучшую в среднем или для наихудшей ситуации точность прогноза используют Q - или G -оптимальные планы соответственно.

Каталоги насыщенных D -, A -, Q -, и G -оптимальных планов, если уравнение является полиномом, приведены в [7.21].

3. Проведение эксперимента в соответствии с выбранным оптимальным планом осуществляется путем измерений на технической системе. При этом для исключения систематических ошибок необходимо провести рандомизацию опытов, т.е. обеспечить случайную последовательность их реализации.

4. Построение математической модели осуществляется обычно на ЭВМ с использованием программ МРА или МИА, которые позволяют вычислить неизвестные коэффициенты модели и интервалы их возможных значений.

Как показывают теория и практика, оптимальный эксперимент позволяет существенно повысить точность модели, т.е. сузить доверительные интервалы коэффициентов.

7.5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процесс в объекте эксперимента описывается на основе априорной информации как некоторая модель в общепринятых терминах, соответствующих определенным физическим переменным. Невозможность независимого измерения или задания значений переменных во всех точках пространства и времени требует введения обоснованной аппроксимации реального поля значений переменной некоторой функцией и задания для выбранной функции некоторых параметров-функционалов. В технических объектах обычно имеются традиционные варианты аппроксимации (постоянный и переменный ток, синусоидальные переменные,

прямоугольные импульсы и т.д.) и функционалов (максимальное, среднеквадратическое, средневыпрямленное значения и т.п.).

Для аппроксимации любой зависимости необходимо иметь исходные сведения о возможных значениях переменной в каких-то точках пространства и времени. В свою очередь, эти значения также являются функционалами, характеризующими более глубокие для данного объекта связи. Таким образом, на каком-то уровне описание процессов в объекте по необходимости становится в пределах данной задачи аксиоматическим.

Вводимая для данного эксперимента аппроксимация должна:

описывать реальное распределение переменной в пространстве и времени «хорошо» и в заранее определенном и обоснованном смысле (например, в смысле среднего или среднеквадратического отклонения);

допускать достаточно простую параметризацию;

быть удобной для обработки принятыми в данном эксперименте способами.

Принятый набор параметров должен удовлетворять нижеперечисленным требованиям:

1. Быть минимальным и в то же время достаточно полно характеризовать параметризуемую функцию.

2. Сохранять определенность или, по крайней мере, допускать приемлемую в данном эксперименте модификацию при возможных в рассматриваемом случае вариантах параметризуемой функции.

3. Допускать измерение всех используемых параметров общепринятыми методами, обеспеченными поверкой или допускающими калибровку по частной методике в ходе эксперимента.

4. Допускать достаточно ясную интерпретацию показаний измерительных приборов в ситуациях, отличных от поверочных или калибровочных.

Примером может быть уже упомянутое среднеквадратическое значение напряжения — вольтметр среднеквадратического значения будет давать показания независимо от соответствия измеряемого сигнала требованию периодичности.

Фактически при этом будет индифферентно некоторое средневзвешенное значение [7.10, 7.11]. Следует отметить, что правильную интерпретацию показаний измерительных приборов в нестандартных ситуациях по их описаниям нередко сделать невозможно, для этого может потребоваться анализ принципа преобразования и схемы прибора.

Некритичное заимствование аппроксимирующих функций или набора параметров может крайне затруднить проведение эксперимента в части подбора измерительных преобразователей, интерпретации показаний, обработки результатов и их истолкования.

В то же время неоправданный отказ от общепринятых аппроксимаций и систем параметров также может осложнить выбор измерительных приборов и затруднит обсуждение, оценку и вне-

рение результатов эксперимента, что для технических исследований недопустимо.

Особо следует отметить частный, но очень распространенный случай обнаружения сигнала по его изменению (или появлению). В этом случае результатом наблюдения является двоичная переменная (есть-нет). При этом основным требованием к контролируемому параметру наблюдаемого процесса является его чувствительность к сигналу и малая чувствительность к другим воздействиям.

Для электротехнического эксперимента наиболее важными параметрами являются значения токов и напряжений, определяемых при описании объекта для различных точек подключения. Следует учитывать, что уже на этом уровне аппроксимации реального электромагнитного процесса необходим критический анализ модели. Достаточно строгое применение понятий «ток» и «напряжение» возможно лишь в ограниченном диапазоне значений переменных и их частотного состава. При малых (до 10^{-9}) и больших (свыше 10^3) значениях тока и напряжения и при частотах более 10^6 Гц большинство объектов для обеспечения погрешности порядка 10^{-3} требует описания не в терминах электрических цепей, а в терминах теории электромагнитного поля. При очень малых токах (до 10^{-15} А) начинает сказываться дискретность электрических зарядов. В конкретных технических задачах для сохранения определенности без усложнения модели объекта при измерении очень малых и очень больших значений переменных применяют специальные методы, исключющие влияние распределенных пространственных характеристик среды [7.24].

Классические варианты, аппроксимаций временных зависимостей (постоянный, переменный, синусоидальный ток) в современных технических системах часто уступают место импульсным сигналам, форма которых не поддается простой аппроксимации. Параметризация импульсных сигналов идет обычно путем аппроксимации наблюдаемой зависимости последовательностью характерных точек. При этом выбор уровней отсчета и моментов фиксации значений должен обеспечить, с одной стороны, соответствие реальным режимам работы данного конкретного устройства в конкретной системе, с другой стороны, возможность сравнения с другими аналогичными объектами. Характерным примером является параметризация сигналов логических элементов по уровням «0» и «1», заданным в конкретном комплексе элементов, и параметризация таких же сигналов по уровням $0,1U_m$; $0,9U_m$ в исследовательских работах, где основным требованием является сопоставимость результатов разных объектов.

Весьма существенные ограничения на выбор параметров системы накладывает номенклатура приборов. Так, хотя для полного описания синусоидальных токов и напряжений необходимо (при заданной частоте) иметь два параметра: A_x и φ_x или Re_x и Im_x , при построении ЭК обычно приходится ограничиваться измерением одного амплитудного параметра в связи с очень малой

распространенностью векторных анализаторов переменного тока. При измерении импульсных напряжений, как говорилось выше, в каждом классе объектов вводится своя система параметров. Весьма перспективной можно считать параметризацию импульсов по интегральному значению, по энергии (по среднеквадратическому значению), по обобщенной амплитуде. Однако измерение таких параметров слабо обеспечено измерительными приборами [7.25].

7.6. ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ)

Проблема параметризации объекта исследования, его электрических характеристик при постановке эксперимента является одной из важнейших для согласования исходных данных в части соответствия посылок проверяемой гипотезы, модели объекта и возможностей средств измерения и обработки информации.

Можно выделить три направления выбора аппроксимации и параметризации характеристик электрических цепей объекта.

1. Анализ физических процессов в объекте позволяет на основании фундаментальных физических представлений построить математическую модель объекта (см. разд. 6). Во всех реальных случаях такая модель создается ценой очень существенных упрощений и для технических устройств очень редко допускает количественный расчет внешних характеристик. Тем не менее, вид функций, получаемых при построении математической модели объекта, может быть использован при аппроксимации реальных характеристик. Параметрами характеристик при этом являются параметры функций, ранее полученных из физических представлений, и отдельных элементов исследуемого устройства. Однако значение этих параметров теперь получается из экспериментальных данных для объекта в целом.

Недостатками аппроксимации характеристик на основе математической модели физических процессов в объекте исследования могут быть: сложность или недостаточная точность определения параметров функций по экспериментальным данным; трудность использования сложных математических зависимостей в инженерных расчетах.

2. Физическая картина процессов в объекте исследования не учитывается. Аппроксимация характеристик и их параметризация выбираются исходя из удобства дальнейшего использования в инженерной практике. Здесь в первую очередь следует упомянуть введение линеаризованных характеристик, которые крайне редко могут получить какое-либо физическое обоснование, но исключительно удобны в расчетах. Реже применяются степенные и экспоненциальные ряды — такая аппроксимация применяется, если нелинейностью характеристики в данном эксперименте пренебречь нельзя.

3. Если объект исследования является техниче-

по признакам, простейшие логические и арифметические операции и т.д. [7.26, 7.28, 7.30].

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ОБЪЕКТА ЭКСПЕРИМЕНТА

При выполнении активных экспериментов в отличие от пассивных предусматривается возможность выполнения определенных воздействий на объект эксперимента. Эти воздействия в соответствии с алгоритмом эксперимента выполняются манипуляционными, регулирующими и стимулирующими системами.

Манипуляционная система предназначена для выполнения разнообразных механических операций (двигательных, вращательных, захватывающих и т.д.), диктуемых процессом эксперимента [7.27].

Регулирующая система обычно предназначена для поддержания на определенном уровне параметров тех или иных компонентов экспериментального комплекса, а также для изменения этих параметров в соответствии с алгоритмом эксперимента. Исполнительными органами системы служат различного рода регуляторы (напряжения, температуры, расхода и т.д.).

Стимулирующая система предназначена для выработки сигналов, позволяющих снять те или иные характеристики испытуемого объекта, а также имитировать реальный режим его работы. Исполнительными элементами этой системы служат различного рода измерительные генераторы, как стандартные, так и специализированного назначения, на выходе которых имеет место или аналоговый сигнал, или цифровая последовательность.

Функционирование всех вышеуказанных систем осуществляется в соответствии с алгоритмами управления, реализуемыми частично только ЭВМ, а частично как ЭВМ, так и экспериментатором (автоматизированное управление режимом работы объекта эксперимента).

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Информация, полученная системой сбора и первичной обработки информации, подвергается вторичной (основной) обработке в ЭВМ. Результаты вторичной обработки частично отправляются непосредственно во внешнее запоминающее устройство ЭВМ, частично используются процессором ЭВМ для выработки алгоритма управления, а также направляются в систему отображения информации. Результаты обработки информации, представленной системой отображения, служат основой для принятия решения экспериментатором [7.25].

Основные задачи автоматизации ЭК, решение которых базируется на применении ЭВМ могут быть сформулированы следующим образом:

сбор, передача, регистрация и отображение экспериментальных данных; управление режимом

работы отдельных компонент АЭК, ходом эксперимента в соответствии с алгоритмом, реализующим план эксперимента;

экспресс-обработка экспериментальных данных в процессе эксперимента, необходимая для контроля за ходом эксперимента и принятия экспериментатором того или иного решения;

окончательная обработка экспериментальных данных;

имитационное моделирование процесса эксперимента с целью анализа стимулирующих воздействий и внешних влияний на модель объекта эксперимента, полученную на основании неполной априорной информации;

создание баз данных, соответствующих тому или иному эксперименту;

хранение информации, отображение информации, ввод информации в АЭК, вывод информации из АЭК, диалог «экспериментатор—АЭК».

Управление автоматизированным экспериментальным комплексом должно обеспечить координацию работы всех технических средств, а также регулирование потоков управляющих сигналов и экспериментальных данных. Управление АЭК реализуется в соответствии с алгоритмом эксперимента, при этом последовательность выполняемых операций может определяться как очередностью обработки информации, так и режимом эксперимента во времени. В первом случае каждая последующая операция начинается по сигналу окончания работы устройства, реализующего предыдущую операцию (условное управление). Во втором случае законы смены операций и адресов компонент комплекса жестко определены во времени (безусловное управление).

Вторичная (основная) обработка результатов эксперимента, требующая больших вычислительных ресурсов, включает в себя такие виды, как статистическая обработка больших массивов информации; цифровая фильтрация; спектральный, корреляционный, регрессионный анализ; идентификация параметров объекта эксперимента и т.д. Результаты вторичной обработки информации могут быть направлены или в систему хранения информации, или в систему отображения и регистрации информации, являющуюся составной частью автоматизированного рабочего места экспериментатора.

Хранение информации осуществляется во внешнем запоминающем устройстве, являющемся штатным оборудованием ЭВМ, где создаются банки данных.

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Под архитектурой АЭК понимают совокупность его свойств и характеристик с точки зрения пользователя, которого в первую очередь интересуют функциональные возможности комплекса (объем и организация оперативной и внешней памяти, быстродействие, способ организации вычислительного процесса, способ обмена информацией, система команд, способ адресации, формат данных и т.д.). Это понятие включает в себя три важнейших

вида взаимосвязанных структур: физическую, логическую и программную. Физическая структура включает в себя технические средства, обеспечивающие сбор, обработку, передачу и хранение информации, а также управление режимами работы объекта эксперимента. Логическая структура представляет собой средства, обеспечивающие создание и разрушение логических каналов между компонентами комплекса. Программную структуру образуют операционная система и пакеты программ, обеспечивающие функционирование комплекса и решение стоящих перед ним задач.

Архитектура отражает концепцию АЭК, правила взаимодействия между компонентами вышеуказанных структур и взаимосвязь между структурами. При создании АЭК возможны различные архитектурные решения, определяемые характером и сложностью объектов эксперимента, классом решаемых комплексом задач, мощностью потоков экспериментальной информации и требуемой скоростью обработки [7.25, 7.26, 7.28].

Анализ опыта разработки АЭК позволяет выделить типовые архитектурные решения АЭК, краткая характеристика которых приведена ниже.

Одноуровневые АЭК. АЭК такого типа наиболее широко применимы в практике экспериментальных исследований. Они могут использоваться как самостоятельно, так и в качестве составной части других типов АЭК [7.25].

В состав одноуровневого АЭК входят все основные компоненты, присущие автоматизированным экспериментальным комплексам (рис. 7.10): система сбора и первичной обработки информации, система управления режимом работы объекта эксперимента, система вторичной обработки информации и управления экспериментальным комплексом, автоматизированное рабочее место экспериментатора. Связь между компонентами одноуровневого АЭК осуществляется с помощью стандартной интерфейсной системы.

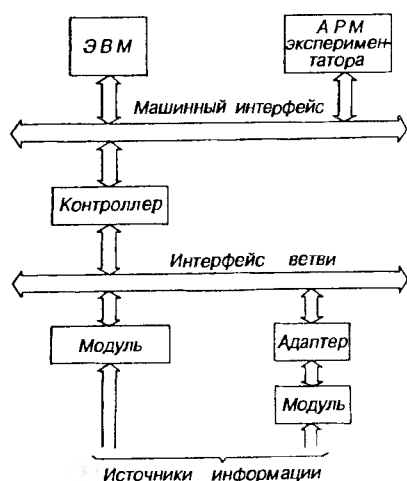


Рис. 7.10. Структурная схема одноуровневого автоматизированного экспериментального комплекса

Подключение аппаратуры АЭК к объекту эксперимента при необходимости осуществляется с помощью специальных устройств — адаптеров, осуществляющих механическое и электрическое сопряжения.

В качестве вычислительного средства в одноуровневых АЭК используют стандартные микроЭВМ и персональные ЭВМ, а в тех случаях, когда одноуровневые АЭК являются составными частями более сложного АЭК, и специализированные микроЭВМ, выполненные на базе микропроцессорных наборов. Основные функции, которые выполняет вычислительное устройство одноуровневого АЭК, это управление сбором и первичной обработкой информации, управление режимами работы объекта эксперимента, а также хранение, отображение и регистрация информации. Но следует отметить, что современные микроЭВМ и персональные ЭВМ имеют значительные вычислительные ресурсы и могут выполнять несложную математическую обработку экспериментальной информации.

Двухуровневые (иерархические) АЭК. Двухуровневые АЭК применяют для выполнения экспериментов на сложных, рассредоточенных в пространстве объектах эксперимента. Как следует из названия, АЭК этого типа имеет два уровня автоматизации: нижний и верхний (рис. 7.11).

На нижнем уровне находятся базирующиеся в основном на микроЭВМ локальные системы автоматизации (одноуровневые АЭК), основной задачей которых является управление экспериментальным оборудованием и сбором информации. Кроме того, на этом уровне могут находиться ветви сбора информации и управления режимом объекта эксперимента, связанные непосредственно с ЭВМ высшего уровня, особенно в том случае, если в соответствии с алгоритмом эксперимента управление этими ветвями необходимо осуществлять в реальном масштабе времени, а для принятия решения по управлению требуется значительная математическая обработка получаемой ветвью сбора измерительной информации [7.26].

На верхнем иерархическом уровне находится вычислительное устройство, которое решает следующие основные задачи:

выработка установок, определяющих режим работы комплексов первого уровня;

управление ходом эксперимента в соответствии с его алгоритмом;

математическая обработка экспериментальных данных;

имитационное моделирование и теоретические расчеты при подготовке эксперимента;

хранение массивов данных, получаемых от подсистем первого уровня, массивов результатов вторичной обработки, баз моделей объектов эксперимента, алгоритмов эксперимента и сервисной информации, обслуживающей имитационное моделирование и теоретические расчеты;

отображение и регистрация информации.

В зависимости от объема вычислительной работы, требуемой для управления режимом эксперимента в реальном масштабе времени, а также

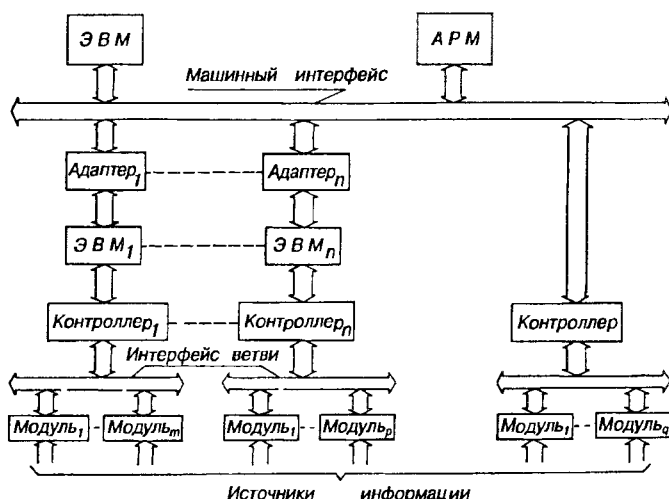


Рис. 7.11. Структурная схема двухуровневого автоматизированного экспериментального комплекса

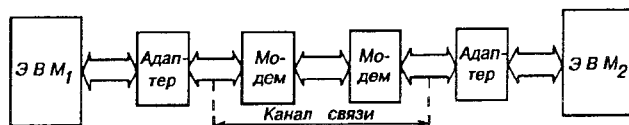


Рис. 7.12. Структурная схема сетевого автоматизированного экспериментального комплекса

требуемых вычислительных ресурсов для вторичной обработки экспериментальных данных и имитационного моделирования эксперимента, на верхнем иерархическом уровне устанавливается большая, средняя или мини-ЭВМ. Верхний иерархический уровень включает в себя одно или несколько автоматизированных рабочих мест. Кроме того, автоматизированными рабочими местами могут оборудоваться по необходимости некоторые из одноуровневых АЭК нижнего уровня.

Связь между экспериментальным оборудованием и ЭВМ в двухуровневых АЭК осуществляется с помощью стандартных интерфейсов.

Связь между ЭВМ нижнего и верхнего уровней осуществляется с помощью устройств межмашинной связи, обеспечивающих информационную совместимость.

АЭК на базе сети ЭВМ. В некоторых случаях технически и экономически более выгодно создавать АЭК на базе ЭВМ, объединенных не в иерархическую систему, а в сеть, под которой понимают объединение равноправных (не соподчиненных) как однородных (однотипных), так и разнородных ЭВМ. Такое объединение позволяет иметь распределенный по всей совокупности ЭВМ банк данных, пользоваться взаимными услугами по обработке экспериментальной информации, провести разумную специализацию ЭВМ сети на тот или иной вид обработки информации [7.25]. Связь между экспериментальным оборудованием и ЭВМ, а также связь ЭВМ—ЭВМ осуществляется так же, как и в двухуровневых АЭК (см. рис. 7.11).

Автоматизированным рабочим местом оборудуется, как правило, каждая ЭВМ.

Структурная схема АЭК на базе сети ЭВМ приведена на рис. 7.12.

АЭК с параллельной обработкой данных. При обработке экспериментальных данных часто имеет место следующая типовая задача: выполнить вычисления по одному и тому же алгоритму через определенные интервалы времени для множества точек, представляющих объекты эксперимента и характеризующих некоторым набором величин, причем обработку необходимо вести в реальном времени при большой скорости исследуемых процессов.

Решение такой задачи накладывает жесткие требования на производительность вычислительных средств АЭК. Высокая производительность может быть достигнута двумя путями: за счет повышения быстродействия компонентов, из которых они выполнены, и за счет архитектуры. Что касается быстродействия компонентов, то здесь возможности в основном исчерпаны, поэтому основным резервом повышения производительности вычислительных средств остается архитектура.

Наиболее перспективным архитектурным решением с точки зрения применения в АЭК являются вычислительные системы, в которых один поток команд выполняется над многими наборами данных.

Вышеуказанные принципы и архитектурное решение наиболее эффективно реализуются с помощью однородных вычислительных систем (ОВС). В качестве примера такой реализации на

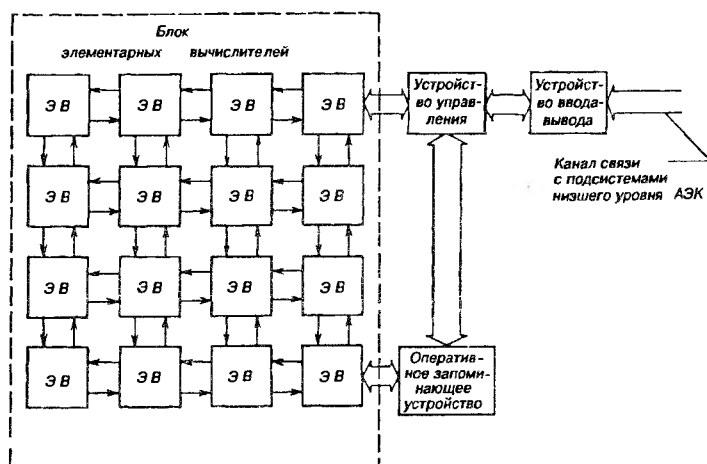


Рис. 7.13. Структурная схема автоматизированного экспериментального комплекса с параллельной обработкой информации

рис. 7.13 приведена структурная схема ОВС матричного типа. Эта ОВС представляет собой двумерную сеть, состоящую из элементарных вычислителей (ЭВ), соединенных каналами связи и управляемых центральным процессором. Каждый элементарный вычислитель включает в себя универсальный или специализированный процессор, предназначенный для выполнения вычислительных операций; системное устройство, осуществляющее операции обмена, управления и настройки; программируемый коммутатор каналов связи, реализующий разнообразные конфигурации связей.

Управление функционированием матричной ОВС осуществляется с помощью центрального процессора и обеспечивает реализацию различных (автономный, параллельной обработки, диспетчера) режимов работы элементарных вычислителей, обмен информацией, перестройку логической структуры системы.

Сопряжения компонентов в АЭК. В АЭК различают сопряжения двух типов: сопряжение ЭВМ с экспериментальным оборудованием и сопряжение различных ЭВМ АЭК (межмашинное сопряжение).

Необходимость сопряжения первого типа связана с тем, что при создании АЭК в систему объединяется широкая номенклатура разнообразного (по своим характеристикам, быстродействию, конструкциям разъемов и т.д.) стандартного и нестандартного оборудования. В процессе работы имеет место интенсивный обмен информацией как между компонентами, так и с ЭВМ системы. Для объединения компонентов в систему и для успешного функционирования последней необходимо обеспечить информационную (структура и состав набора шин, временные соотношения между управляющими сигналами, форматы данных, управляющих сигналов, адресов и т.д.), электрическую уровни и временные параметры электрических сигналов, помехозащищенность сопрягаемых цепей

и т.д.) и конструктивную (разъемы, геометрические размеры конструктивных модулей и т.д.) совместимость объединяемых устройств. В АЭК указанные виды совместимостей реализуют с помощью стандартного интерфейса, под которым понимают совокупность технических средств сопряжения, программного обеспечения и правил (протоколов), обеспечивающих процесс обмена информацией в системе. В настоящее время разработано довольно много стандартов на интерфейс и самих интерфейсных систем [7.29]. В нашей стране наибольшую известность получили интерфейсы КОП и КАМАК.

Для построения АЭК используется модульный принцип. В соответствии с этим принципом каждый компонент АЭК рассматривается и реализуется в виде модуля, т.е. функционально и конструктивно законченного блока, который имеет два узла: узел, выполняющий функцию, соответствующую назначению модуля, и узел сопряжения модуля с магистралью интерфейса (интерфейсная карта). Модульный принцип позволяет получить гибкую, легко перестраиваемую и меняющую состав оборудования систему.

В модульном исполнении по вышеуказанной причине выполняется также входящая в состав АЭК ЭВМ, т.е. модули процессора, запоминающего устройства и машинной периферии объединяются стандартным машинным интерфейсом (ОШ, ИЧ1, МПИ и т.д.).

Следует отметить, что стандартные интерфейсы, объединяющие экспериментальное оборудование (интерфейс ветви) и стандартные машинные интерфейсы несовместимы и для их сопряжения предусматривается специальное устройство, называемое контроллером.

Сопряжение ЭВМ между собой обуславливается тем, что каналы ввод-вывод даже двух совершенно одинаковых ЭВМ, не говоря уже о разных, в силу их несимметричности несовместимы. Для объеди-

нения ЭВМ используют специальные устройства, называемые адаптерами. Различают адаптеры микропроцессорной связи (АМС) и адаптеры дистанционной связи (АДС).

Адаптер микропроцессорной связи используется в том случае, если объединяемые ЭВМ расположены на небольшом (десятки метров) расстоянии. Адаптер в виде модуля подключается к интерфейсу одной ЭВМ, и кабелем, имеющим такое же количество жил, как и интерфейс, присоединяется к интерфейсу другой ЭВМ. Такое соединение дает возможность одной ЭВМ обращаться к оперативной памяти другой, как к своему периферийному устройству. Адаптер дистанционной связи используется, когда расстояния между объединяемыми ЭВМ велики (километры, десятки километров). В этом случае информация через адаптер и устройство модуляции-демодуляции (модем) передается в линию связи и принимается на другом конце через модем и адаптер.

Обмен информацией в АЭК. Для нормальной работы в АЭК должно быть организовано информационное взаимодействие, т.е. обмен информацией, между его компонентами. Использование в АЭК общих магистралей (интерфейсов) для обмена информацией требует разделения каналов передачи во времени с целью обеспечения ее бесконфликтной (без наложения передаваемых потоков информации) передачи. В связи с этим процесс обмена информацией в АЭК регламентируется протоколами, которые представляют собой совокупность правил, обеспечивающих разделение каналов, приоритеты работы компонентов системы, форму представления данных и управляющих сигналов, режим обмена и т.д.

В АЭК различают три способа организации обмена: синхронный, асинхронный и по прерыванию.

Синхронный способ характеризуется тем, что интервалы следования сообщений постоянны и определяются процессором ЭВМ. Все внешние по отношению к ЭВМ устройства играют пассивную роль, передавая или принимая информацию по команде ЭВМ.

В асинхронном способе эти интервалы произвольны и определяются быстродействием внешних устройств. ЭВМ в асинхронном режиме определяет готовность внешних устройств к обмену и, прерывая выполнение фоновой программы, организует обмен с учетом приоритета работы внешних устройств. Все внешние устройства в этом случае также играют пассивную роль.

Отличительной чертой способа обмена по прерыванию является активность внешнего устройства, так как оно выступает инициатором обмена.

Техническое обеспечение АЭК. Под техническим обеспечением АЭК понимают комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих средств, обеспечивающих выполнение автоматизированного эксперимента.

Вычислительные средства. Для создания АЭК используют различные вычислительные средства: большие или средние универсальные ЭВМ, мини-

ЭВМ, микроЭВМ, персональные ЭВМ, многопроцессорные ЭВМ, специализированные ЭВМ, построенные на базе микропроцессорных наборов.

Выбор используемого вычислительного средства определяется характером эксперимента, особенностями и сложностью объекта эксперимента, уровнем АЭК, на котором используется ЭВМ, сложностью математической обработки результатов эксперимента. Так, если вычислительное устройство предназначено в основном для управления экспериментальным оборудованием, т.е. полученная экспериментальная информация не требует сложной математической обработки, то обычно применяют микроЭВМ и ЭВМ. При необходимости управления в реальном масштабе времени, когда требуются значительные вычислительные возможности, используют мини- или мультиплексорную ЭВМ. Если же полученная экспериментальная информация требует сложной математической обработки или режим управления АЭК в реальном масштабе времени требует больших вычислительных возможностей, то в составе АЭК может быть предусмотрена средняя или большая ЭВМ.

Средства отображения информации. Они представляют экспериментатору информацию, необходимую для принятия решений по управлению экспериментом и для анализа результатов эксперимента. Основой АРМ экспериментатора является алфавитно-цифровой дисплей, отображающий информацию на экране ЭЛТ и имеющий алфавитно-цифровую клавиатуру для ввода информации в АЭК. АРМ экспериментатора может быть оборудован графическим дисплеем, отображающим на экране графическую информацию (объемное изображение, схему и т.д.). На бумажный носитель графическая информация выводится с помощью стандартных графопостроителей или чертежных автоматов, а алфавитно-цифровая — с помощью алфавитно-цифрового печатающего устройства ЭВМ [7.28].

Средства сопряжения. К этим средствам относятся интерфейсы, контроллеры и адаптеры. В настоящее время разработано довольно много стандартов на интерфейс и самих интерфейсных систем. В нашей стране наибольшую известность получили интерфейсные системы КАМАК и КОП (канал общего пользования) [7.29, 7.30].

Система КАМАК (применение ЭВМ для измерения и управления) была предложена Комитетом европейских стандартов ядерной электроники и рекомендована Международной электротехнической комиссией. Основу КАМАК составляет унифицированный набор конструктивно законченных функциональных модулей. В настоящее время разработано свыше тысячи различных модулей, подразделяющихся на несколько функциональных групп: входные, выходные, сопряжения, преобразования, обработки информации и т.д. К модулям некоторых функциональных групп подключаются внешние устройства. Связь между модулями и этими устройствами реализуется в соответствии со стандартами на аналоговые и цифровые сигналы или стандартом КАМАК. К магистрали системы

модули присоединяются с помощью стандартных разъемов. Конструируются модули в виде вставных блоков, устанавливаемых в стандартные каркасы (крейты). Каждый крейт содержит 25 ячеек, из которых 23 занимают функциональные модули и две — контроллер, предназначенный для управления модулями крейта и сопряжения с ЭВМ.

Модули объединяются в систему с помощью магистрали, которая содержит три подсистемы шин: внутрикрейтовую, с параллельной передачей данных и последовательной передачей данных. Внутрикрейтовая подсистема предназначена для обмена данными между модулями крейта. Подсистема с параллельной передачей данных обеспечивает обмен информацией между несколькими крейтами (максимально до семи, объединенных в одну стойку) и ЭВМ. Такую систему целесообразно применять для больших пространственно ограниченных АЭК или подсистем АЭК. Подсистема с последовательной передачей данных применяется при организации многокрейтовых систем, распределенных на большой территории (крейты разнесены на большие расстояния). Крейты соединяются последовательно и образуют замкнутую цепь с ЭВМ.

Приборный интерфейс, известный под названием КОП, реализует байт-последовательный и бит-параллельный способы обмена информацией. Режим обмена информацией асинхронный. Уровни сигналов совместимы с логическими уровнями ТТЛ ИС. Магистраль интерфейса представляет собой гибкий кабель, который содержит 16 линий (8 информационных, 8 управляющих) и допускает подключение до 15 устройств на расстоянии не более 20 м. Скорость передачи данных до 1 Мбайт/с. Приборы и оборудование для подключения к магистрали КОП должны иметь интерфейсную карту-плату. В большинстве последних разработок приборов установка такой платы предусматривается заводом-изготовителем.

Контроллер канала выполняет функции физического и логического сопряжения, а также функцию управления по заданной программе. Он анализирует состояние канала связи, потребности модулей в обмене, выдает разрешение на занятие канала, организует связь с каналом прямого доступа ЭВМ и т.д. В состав контроллера может быть включен буфер данных в целях разделения во времени обмена информацией между интерфейсом ветви и ЭВМ при существенном различии в их быстройдействии.

Адаптер обеспечивает возможность обращения к оперативной памяти «чужой» ЭВМ, как к периферийному устройству «своей» ЭВМ. Кроме того, адаптер частично осуществляет функции управления обменом информации и помехоустойчивое кодирование и декодирование информации.

Средства сбора информации и управления режимом эксперимента. В состав этих средств входит стандартная и нестандартная аппаратура, обслуживающая эксперимент: измерительные преобразователи, коммутаторы, АЦП, ЦАП, генераторы стимулирующих воздействий, блоки

управления манипуляторами и регуляторами, блоки первичной обработки информации. Наиболее перспективным и предпочтительным считается путь, когда эти средства изготавливаются в модульном исполнении в каком-либо стандарте, например система КАМАК. Применяемое оборудование может быть изготовлено и в приборном исполнении, но в этом случае прибор должен быть оборудован интерфейсной картой, сопрягающей его с магистралью интерфейса. Значительное число типов приборов выпускается с встроенными интерфейсными картами для использования в системе КОП.

Средства передачи данных. К ним относятся устройства преобразования сигналов модемы (модулятор-демодулятор) и линии связи.

Программное обеспечение АЭК. Программное обеспечение (ПО) АЭК — это набор программ, обеспечивающих функционирование программируемых средств АЭК и выполнение ими их целевых функций. ПО АЭК подразделяется на системное и прикладное.

Системное ПО включает в себя операционную систему ЭВМ, средства диагностики и контроля вычислительного комплекса и некоторые дополнительные программные средства.

Прикладное ПО реализуется, как правило, в виде пакетов прикладных программ, под которыми понимаются комплексы программ, предназначенных для решения определенных задач или классов задач с технической документацией на них.

Для выполнения конкретного автоматизированного эксперимента разрабатывается алгоритм его проведения и реализующая этот алгоритм программа, состоящая из двух частей: основной (управляющей) программы и набора обслуживающих, рабочих и обрабатывающих подпрограмм. Управляющая программа должна обеспечивать диалоговый режим работы, т.е. предоставлять экспериментатору возможность вмешиваться в ход эксперимента [7.25].

Лингвистическое обеспечение АЭК. Под лингвистическим обеспечением АЭК понимают набор языковых средств, позволяющих реализовать программное обеспечение АЭК и обмен информацией между экспериментатором и АЭК в процессе его эксплуатации.

Языки, составляющие лингвистическое обеспечение АЭК, делятся на две группы:

языки программирования, предназначенные для разработки и отладки прикладных программ; входные языки, обеспечивающие задание исходных данных и режимов эксперимента, а также обмен информацией между экспериментатором и АЭК при выполнении эксперимента, анализа результатов эксперимента, теоретических расчетов при его подготовке и моделировании.

В качестве языков программирования в АЭК используют машинно-ориентированный язык Ассемблер, обеспечивающий минимальные затраты машинного времени и памяти при исполнении прикладных программ, и алгоритмические языки высокого уровня типа Фортран, Паскаль, Си и др.,

позволяющие создавать машинно-независимые программы и резко сократить затраты труда на их разработку.

Входные языки служат для общения экспериментатора с ЭВМ, обеспечивая ему максимальные удобства для описания объекта эксперимента (язык описания объекта), задания на выполнение эксперимента (язык описания заданий). Они также используются в процессе эксперимента, при имитационном моделировании и теоретических расчетах (диалоговые языки). Входные языки проблемно-ориентированны, так как разрабатываются для конкретного АЭК, предназначенного для выполнения определенного класса экспериментов.

Информационное обеспечение АЭК. Информационное обеспечение представляет собой совокупность данных, используемых в процессе эксперимента, его теоретической подготовки и имитационного моделирования. Эти данные хранятся во внешней памяти ЭВМ. Они организованы в виде банка данных, который включает в себя набор баз данных и систему управления базами данных.

Система управления базами данных — это набор программ, позволяющий прикладным программам и экспериментатору работать с базами данных без знания конкретного способа размещения данных в ЭВМ [7.28].

Математическое обеспечение АЭК. Оно включает в себя набор:

- методов вычислительной математики;
- математических моделей объекта эксперимента и стимулирующих воздействий;
- алгоритмов управления ходом эксперимента;
- алгоритмов управления аппаратурой, обеспечивающей сбор информации и изменение режимов объекта эксперимента;
- алгоритмов математической обработки экспериментальной информации [7.28].

Методы вычислительной математики используются при разработке математических моделей, управляющих и обрабатывающих алгоритмов.

Математические модели объектов эксперимента и стимулирующих воздействий используются при имитационном моделировании, проводимом в целях получения вышеуказанных алгоритмов.

Набор типовых алгоритмов управления используется при разработке конкретных управляющих алгоритмов непосредственно или после некоторой модификации.

Алгоритмы обработки измерительной информации обеспечивают решение задач цифровой фильтрации, идентификации (построения модели объекта по экспериментальным данным), распознавания образов, определении статистических характеристик и т.д.

Метрологическое обеспечение АЭК. В соответствии с ГОСТ 8.437-81 под метрологическим обеспечением понимают комплекс мер, направленных на достижение и поддержание требуемой точности измерения. Основа метрологического обеспечения заключается в установлении комплекса нормируемых метрологических характеристик и

разработке методов и средств их определения и проверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 7.1. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений: Пер. с англ./Под ред. И.А. Ушакова. М.: Мир, 1981.
- 7.2. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. Л.: Наука, 1971.
- 7.3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965.
- 7.4. Хьютсон А. Дисперсионный анализ: Пер. с англ./Под ред. И.А. Ушакова. М.: Статистика, 1971.
- 7.5. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электротехники). М.: Высшая школа, 1984.
- 7.6. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1974.
- 7.7. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ./Под ред. И.А. Ушакова. М.: Мир, 1980.
- 7.8. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975.
- 7.9. Лавренчик В.Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 7.10. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982.
- 7.11. Гитис Э.И., Пискунов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982.
- 7.12. Найденов А.И. Трансформация спектра наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1979.
- 7.13. Роуз Дж. Ж. Теория электрических фильтров: Пер. с англ./Под ред. А.М. Трахтмана. М.: Советское радио, 1980.
- 7.14. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры: Пер. с англ./Под ред. И.Н. Теллюка. М.: Мир, 1982.
- 7.15. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986.
- 7.16. Расстригин Л.А. Система экстремального управления. М.: Наука, 1981.
- 7.17. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерения: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 7.18. Статистические методы в инженерных исследованиях / Под ред. Г.К. Круга М.: Высшая школа, 1983.
- 7.19. Вошинин А.П., Сотиров Г.Р. Оптимизация в условиях неопределенности. М.: Изд-во МЭИ, изд-во «Техника» (София), 1989.
- 7.20. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. М.: Статистика, 1983.
- 7.21. Горелик А.П., Скрыпник В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1977.
- 7.22. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин:

Пер. с англ./Под ред. Д.С. Лебедева. М.: Мир, 1972.

7.23. Илюкович А.М. Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976.

7.24. Грязнов М.И. Интегральный метод измерения импульсов. М.: Советское радио, 1975.

7.25. Задков В.Н., Пономарев Ю.В. Компьютер в эксперименте: архитектура и программные средства автоматизации. М.: Наука, 1988.

7.26. Капиев Р.Е. Измерительно-вычислительные комплексы. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

7.27. Управляющие и вычислительные устрой-

ства роботизированных комплексов на базе микро-ЭВМ / В.С. Медведев, Г.А. Орлов, Ю.И. Рассадкин и др. М.: Высшая школа, 1990.

7.28. Ступин Ю.В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1982.

7.29. Мячев А.А., Степанов В.Н., Щербо В.К. Интерфейсы систем обработки данных. М.: Радио и связь, 1989.

7.30. Краус М., Кучбах Э., Вошни О. Сбор данных в управляющих вычислительных системах. М.: Мир, 1987.

Раздел 8

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ

СОДЕРЖАНИЕ

8.1. Характеристика задач автоматизированного проектирования	165
Понятия и этапы проектирования с позиций их автоматизации (165). Влияние ЭВМ на организацию и технологию проектирования (166). Основные этапы развития работ по автоматизации проектирования (167). Состав и структура САПР (168)	
8.2. Модели и алгоритмы функционального проектирования	170
Алгоритмы поиска аналогов проектируемого объекта (170). Алгоритмы опре-	

деления прототипов (172). Многокритериальная оптимизация (173). Постановка задачи синтеза допусков на параметры (174)	
8.3. Алгоритмы автоматизированного конструирования	175
Особенности и направления автоматизации конструирования (175). Алгоритмы расчетно-геометрического моделирования на основе типовых элементов (175). Модели и алгоритмы расчета размерных цепей (176)	
Список литературы	178

8.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ПОНЯТИЯ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПОЗИЦИЙ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Задача проектирования в практическом плане состоит в разработке описания объекта, выполняющего новые функции. Это описание фиксируется в виде проектной документации, предназначенной для организации производства и эксплуатации созданного объекта. Проектирование всегда ведется с учетом разнообразных ограничений, к которым относятся доступные материальные и людские ресурсы, а также при заданных производственных условиях и эксплуатационных воздействиях. В распоряжении проектировщика находится ряд атрибутов, например принципы действия, взаимное расположение элементов устройства или системы, значения параметров и прочие, которые можно изменять для достижения цели проектирования. В свою очередь, цели проектирования могут быть выражены в виде ограничений на основные рабочие показатели или целевой функции (критерия эффективности), выражающей зависимость между

атрибутами и рабочими показателями проектируемого объекта.

При этом задача проектирования может формулироваться по-разному в зависимости от того, что проектируется — система, в состав которой входит ряд устройств, или отдельное устройство. В качестве примера проектирования системы можно привести задачу развития электрической сети при возрастании числа и мощности пунктов потребления электроэнергии, состоящую в определении структуры сети. При этом сеть формируется из стандартных элементов и должна удовлетворять заданному критерию экономической эффективности при выполнении ряда ограничений. Сформулированная задача иногда называется задачей структурного проектирования или структурного синтеза.

Проектирование нового элемента системы (устройства) проводится с учетом условий его работы в составе системы. Эти условия, как правило, выражаются в виде некоторого множества ограничений и целевой функции. В результате проектирования необходимо получить значения параметров разрабатываемого устройства, например статического тиристорного компенсатора, фазы линии электро-

передачи, электромеханического генератора и т.д. Проектирование устройств часто может быть сведено к задаче параметрического синтеза, когда структура объекта уже выбрана и необходимо определить значения параметров.

Кроме того, принято разделять задачи проектирования на задачи внешнего проектирования, формирования облика объекта и его внутреннего проектирования. Внешнее проектирование предполагает конкретизацию целей и задач проектируемого объекта, а также определение требований к его функционированию в составе некоторой системы. Согласование требований внешнего проектирования с возможностями внутреннего проектирования составляют задачу формирования облика проектируемого объекта. Наконец, внутреннее проектирование имеет целью разработку объекта с заданными свойствами при заданных ограничениях.

Ниже рассмотрим вопросы проектирования отдельных электротехнических устройств, хотя общие подходы к организации проектных работ могут быть распространены и на задачи структурного синтеза.

Комплексирование частных задач проектирования может быть основано на формировании упорядоченных подмножеств задач функционального проектирования, с одной стороны, и задач конструирования — с другой. При определении облика проектируемого объекта между выделенными подмножествами задач осуществляются тесные взаимосвязи, а последовательность их выполнения задается с учетом особенностей конкретного проекта. Например, при ведущей роли массогабаритных показателей целесообразно начать проектирование с компоновки конструкции.

Функциональное проектирование может включать задачи принятия проектных решений с учетом одного или нескольких критериев предпочтения при возможном варьировании внутренних параметров объекта, алгоритмов его управления или совместном изменении параметров объекта и управляющих воздействий. В другую цепочку включаются задачи конструкторской проработки сборочных единиц и деталей изделия с определением и оценкой геометрических и механических показателей.

Если какая-то из задач оказывается неразрешимой в рамках одной из выделенных цепочек, то необходимо предусмотреть возврат к этапу формирования облика объекта для координированного изменения входных данных, определяющих начальное состояние параллельно выполняемых проектных работ.

После этого целесообразно выполнить детальный анализ функциональных показателей всего объекта, определить допуски на его параметры, произвести имитационное моделирование с учетом воздействующих технологических и эксплуатационных факторов, наметить пути управления качеством продукции. При этом задачи детального анализа функциональных показателей могут выполняться параллельно, а получение удовлетво-

рительных результатов анализа приводит к необходимости возврата на более ранние этапы проектирования. Блок задач определения допусков на параметры и имитационного моделирования в первом приближении может рассматриваться как самостоятельный с включением локальных обратных связей при неудовлетворительных результатах моделирования. При более глубоком рассмотрении задачи определения допусков может оказаться необходимым изменение ранее найденных номинальных значений параметров, что требует организации соответствующих обратных связей.

Обеспечение возможностей организации, перестроения и развития логической схемы автоматизированного проектирования делает целесообразным разделение функций его общего управления и управления выполнением отдельных проектных процедур. Это же требуется и для обеспечения независимого решения частных проектных задач. Функции общего управления автоматизированным проектированием состоят в обеспечении перехода от выполнения одной задачи (процедуры) к другой, что предполагает оценку выполнимости выбранной процедуры, обработку заданий на прерывание проектного процесса и запуск его с указанной точки, а также наблюдение за развитием проекта. Соответствующий алгоритм должен предусматривать циклическое выполнение перечисленных функций, что упрощает его настройку на конкретные условия применения и обеспечивает открытость средств управления для возможных модификаций и развития.

В функции управления отдельными проектными процедурами необходимо включить организацию взаимодействия компонентов программного и информационного обеспечения автоматизированного проектирования, а также обмен данными с пользователями.

ВЛИЯНИЕ ЭВМ НА ОРГАНИЗАЦИЮ И ТЕХНОЛОГИЮ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Вычислительные машины практически с момента своего появления находят широкое применение в проектировании электротехнических и электротехнических объектов. Значительный прогресс, достигнутый в таких важнейших показателях ЭВМ, как быстродействие (производительность), объем оперативных и внешних запоминающих устройств, надежность, компактность, стоимость, удобство и доступность применения, приводит к тому, что в настоящее время рабочее место расчетчика, конструктора или технолога может быть снабжено персональной ЭВМ (ПЭВМ) со специализированным набором внешних устройств. В качестве примера рассмотрим данные современной графической рабочей станции HP 9000/300 фирмы Хьюлетт-Паккард: разрешающая способность цветного графического дисплея 1280×1024 точки, оперативная память до 32 Мбайт (1 Мбайт памяти позволяет сохранять около 500 страниц текста), накопитель на жестком магнитном диске емкостью 330—660 Мбайт, накопитель на кассетной магнитной ленте — 67 или 133 Мбайт, графопостроитель

формата от А4 до А0, устройство ввода графической информации формата А3. Производительность ПЭВМ, входящей в состав станции, такова, что можно воспроизводить на экране дисплея движущиеся трехмерные полутонные изображения.

Вычислительные машины, обладая значительными возможностями для автоматизации ввода, преобразования и представления информации, не могут не оказывать существенного влияния на организацию и технологию проектных работ.

Прежде всего применение ЭВМ позволяет расширить число задач разработки новой техники, решаемых на ранних этапах проектирования за счет широкого использования точных и достоверных математических моделей проектируемых объектов. Так, например, на ЭВМ удается решать задачи вероятностного анализа поведения создаваемого объекта с учетом реальных условий производства и эксплуатации. А это открывает возможности для управления качеством выпускаемой продукции, для оценки ее надежности, работоспособности в экстремальных условиях и пр.

Весьма большая производительность ЭВМ позволяет переходить к многовариантному проектированию и к оптимизации, в процессе которых можно определить лучшие варианты проекта.

ЭВМ незаменима и как весьма объемное и быстродействующее хранилище проектной информации. В нем могут сохраняться не только программы обработки данных, но и необходимая справочная информация, а также описания ранее выполненных проектных разработок. Эти описания могут быть использованы для более быстрого получения типовых проектных решений, для учета накопленного опыта проектирования в новых разработках. Для оценки возможностей современных ЭВМ в отношении работы с информацией укажем, что только один оптический накопитель может сохранять объем информации, превышающей объем всех томов Большой Советской энциклопедии, а время доступа к этой информации не превышает 200 наносекунд. Это, в свою очередь, позволяет надеяться на создание интеллектуальных систем автоматизированного проектирования, в которых сочетались бы возможности поиска новых проектных решений, которые в настоящее время являются результатом исключительно творческих усилий человека-проектировщика, доведения их в кратчайшие сроки до производства новых изделий и выполнения ими заданных общественно полезных функций.

ЭВМ оказывают самое существенное влияние и на технологию выполнения проектных работ. Исторически первыми стали применяться автоматические графопостроители для выполнения трудоемких чертежных работ. Эти графопостроители, как правило, работали автономно от ЭВМ по заранее подготовленной программе. Действительно революционное изменение технологии проектирования было вызвано появлением технических и программных средств диалогового взаимодействия проектировщика с ЭВМ и особенно средств графического диалога. Важное место в проектировании нашли такие средства

современной информационной технологии, как электронные таблицы ввода-вывода и преобразования информации, системы управления базами данных, системы иллюстративной, деловой, инженерной графики и др. Перспективным является применение в проектировании экспертных систем, а также идей искусственного интеллекта.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Первые фирмы, которые занялись разработками средств автоматизированного проектирования в электротехнике, были основаны в США во второй половине 60-х годов. Уже в это время появились системы проектирования, имеющие в своем составе графические дисплеи. В основе таких систем находились малые ЭВМ. Определенное представление об этапных событиях в развитии средств информационной технологии, позволивших поднять производительность труда проектировщиков, дает табл. 8.1.

Т а б л и ц а 8.1

Год начала промышленного применения	Наименование средства
1975	Программные средства машинной графики
1977	Электростатический графопостроитель
1978	Растровый графический дисплей
1980	Цветной растровый дисплей
1981	Супермини - ЭВМ
1982	Программное обеспечение для формирования и преобразования объемных графических моделей
1983	Профессиональные персональные ЭВМ
1989	Компьютерное моделирование виртуальной реальности
1990	Транспьютеры

Если первые системы автоматизированного проектирования (САПР) предназначались в основном для автоматизации графических работ и для разработки программ числового программного управления станками и автоматическими линиями, то современные САПР охватывают комплекс проектных работ. Как правило, в их составе имеется единая база данных, в которой формируется описание проектируемого объекта, а средства управления данными осуществляют автоматический контроль правильности задаваемой информации. Например, САПР фирмы HAN для проектирования изделий электротехники включает в свой состав средства для черчения и генератор стандартных элементов изображений, программы для составления таблиц соединений, модули для расчета сечения кабеля, составления чертежей жгутов, библиотеку электротехнических элементов и пр. Подобные САПР строятся на основе профессиональных графических рабочих станций, примерные технические данные которых были приведены выше. Кроме того, имеется возможность объединения этих станций в локальные вычислительные

сети для ускорения обмена проектными данными между отдельными проектировщиками или подразделениями проектной организации.

СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР

Термин САПР весьма многозначен. В переводной литературе существует целая совокупность понятий не в полной мере эквивалентных САПР: CAE — *Computer Aided Engineering* (инженерные расчеты с помощью ЭВМ); CAD — *Computer Aided Design* (проектирование с помощью ЭВМ); CAM — *Computer Aided Manufacturing* (производство с помощью ЭВМ); CAD / CAM — интегрированные системы проектирования и производства.

Под термином САПР понимается система проектирования, в которой органично объединены творческие усилия коллектива проектировщиков и возможности математических методов и ЭВМ на всей совокупности взаимосвязанных этапов проектирования с применением развитых средств программирования и информационного обеспечения для коренного улучшения качества проектных работ и сокращения их сроков, что достигается благодаря: систематизации и совершенствованию проектного процесса, которые сопровождаются перестройкой структуры и кадрового состава проектных организаций;

применению эффективных математических моделей проектируемых объектов;

комплексной оптимизации принимаемых проектных решений;

улучшению информационного обеспечения разработок;

автоматизации трудоемких и рутинных работ;

частичной замене макетирования и натурных испытаний математическим моделированием;

интеграции с другими этапами жизненного цикла проектируемых изделий.

Комплекс средств автоматизации проектирования (КСАП), входящих в состав САПР, принято подразделять на средства методического, программного, технического, информационного и организационного обеспечения.

Методическое обеспечение представляет собой совокупность документов, устанавливающих состав, правила отбора и эксплуатации средств обеспечения автоматизированного проектирования, необходимых для его выполнения. Методическое обеспечение дополнительно разделяют на средства математического и лингвистического обеспечения. При этом математическое обеспечение, рассматриваемое как совокупность различных математических методов и алгоритмов, предназначается для выполнения преобразований описания объекта проектирования, а лингвистическое служит для представления полученных описаний.

Программное обеспечение (ПО) включает совокупность машинных программ, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования и документацию к ним. САПР является программно-управляемой системой. Поэтому ПО составляет сердцевину средств ее обеспечения как по значению, так и по трудоемкости создания. В составе ПО

САПР по функциональным признакам выделяются системы математического обеспечения ЭВМ как часть ПО, инвариантная областям применения ЭВМ, общесистемное ПО САПР (к которому, в частности, можно отнести ПО машинной графики, диалоговые системы и др.) и прикладное ПО, служащее непосредственно для решения задач проектирования конкретного класса объектов.

Техническое обеспечение состоит из совокупности взаимодействующих средств вычислительной и организационной техники, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования. В большинстве случаев техническое обеспечение САПР базируется на серийно выпускаемых ЭВМ различной производительности, снабженных не только штатным, но и специализированным периферийным оборудованием.

Информационное обеспечение объединяет совокупность сведений, необходимых для функционирования САПР и представленных в заданной форме. Для ведения автоматизированного проектирования большая часть этих сведений (данных) должна записываться на машинные носители информации и в процессе работы САПР обрабатываться ЭВМ. Информационное обеспечение концентрирует опыт проектирования данного класса объектов, содержит необходимые справочные данные, сохраняет описание проектируемого объекта, облегчает передачу данных при переходе от этапа к этапу проектирования.

Организационное обеспечение содержит совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, функции и взаимосвязи подразделений, а также форму представления проектных документов.

С учетом весьма большой трудоемкости разработки компонентов средств обеспечения автоматизированного проектирования КСАП должна обладать готовностью к смене объектов и задач проектирования за счет возможности развития функциональных компонентов системы, включающих технические средства, языки описания объекта проектирования и диалогового взаимодействия с пользователями, средства машинной графики, базы данных и средства управления ими, операционные системы и языки программирования, т.е. все то, что может быть названо инструментарием автоматизированного проектирования. Это развитие должно быть предусмотрено при формировании структуры КСАП и обеспечиваться специальными программными средствами управления процессом проектирования и его адаптации к изменяющимся объектам и условиям проектирования. Возможность выполнения названного требования обеспечивается в настоящее время определенной стабильностью в технологии информатики при повышении удельной вычислительной мощности ЭВМ и расширении функций интерфейса, а также преимуществом прикладного программного и информационного обеспечения при переходе на более совершенную вычислительную технику.

Основными структурными звеньями САПР являются подсистемы, объединяющие ряд компонентов

средств обеспечения и предназначенные для получения проектных решений и соответствующих проектных документов. Примерная схема комплекса средств обеспечения автоматизированного проектирования, инвариантная к классу объектов проектирования, показана на рис. 8.1.

Объединение средств обеспечения, предназначенных для решения различных задач автоматизированного проектирования, в составе единой системы представляет собой нетривиальную задачу, трудоемкость решения которой может достигать десятков и даже сотен человеко-лет. Такие затраты целесообразны лишь в тех случаях, когда следует ожидать скачкообразного улучшения результатов проектирования при сохранении этого положительного эффекта в течение длительного времени или когда результат проектирования не удастся

получить иными средствами. Обе эти причины характеризуют современный уровень развития систем проектирования электротехнических и электроэнергетических объектов.

Создание САПР открывает принципиальные возможности для перехода к системному проектированию, предусматривающему среди решения других задач планирование жизненного цикла объектов новой техники и определение последствий их внедрения в производство и эксплуатацию.

В настоящее время в электротехнической промышленности нашей страны действует около 30 фрагментов САПР, на предприятиях, занимающихся проектированием асинхронных двигателей, электрических машин автономной энергетики, гидро- и турбогенераторов, трансформаторов, преобразовательной техники, распределительных устройств.

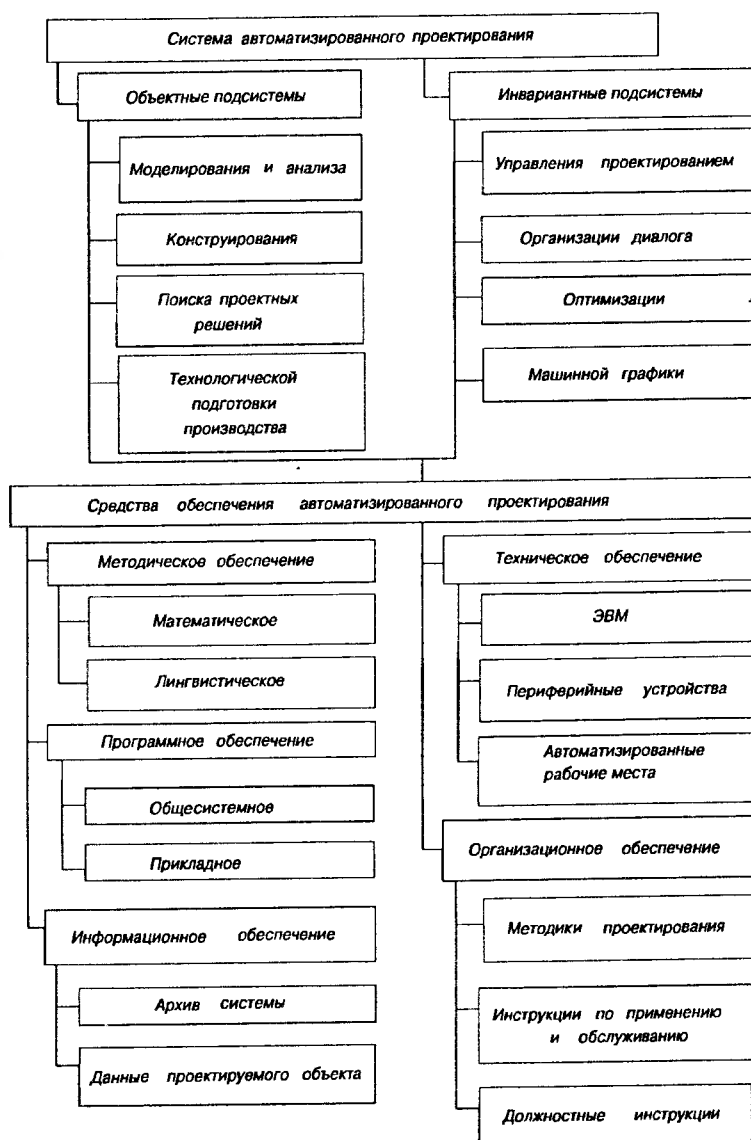


Рис. 8.1. Структурная схема комплекса средств автоматизированного проектирования

8.2. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Функциональное проектирование может быть сведено к задаче принятия проектных решений и состоит в определении принципа действия, характеризующего преобразования потоков энергии и информации в объекте, его конструкции, значений параметров и допусков на параметры.

Общую проблему принятия проектных решений можно формализованно представить в виде задачи оптимизации некоторого функционала

$$F^s(\vec{x}^s + \Delta\vec{x}^s) \rightarrow \min \Rightarrow S^*, \vec{x}^{s*}, \Delta\vec{x}^* \quad (8.1)$$

$$s \in S, \vec{x} + \Delta\vec{x} \in D$$

при задании допустимой области D как

$$D: \varphi_j^s(\vec{x}^s + \Delta\vec{x}^s) \geq 0, j = \overline{1, P}; S = \{1, 2, \dots, k\}, \quad (8.2)$$

где S — конечное множество вариантов проекта, различающихся принципом действия и структурой; F^s — некоторый обобщенный критерий предпочтения одного варианта другому; $\vec{x}^{s*}$ и $\Delta\vec{x}^*$ — векторы оптимальных значений параметров и допусков на параметры.

Условия (8.2) представляют функции ограничений, среди которых могут присутствовать ограничения как типа неравенств, так и типа равенств.

Учет таких общих особенностей математического описания проектируемых объектов, как многопараметричность, многообразие и нелинейность функций целей и ограничений, возможные пологость и неравномерность, характеризующие изменения критериев оптимальности, дискретность ряда параметров, приводит к необходимости рассмотрения проблем принятия проектных решений для данного класса объектов как векторных задач нелинейного частично дискретного программирования.

Методы оптимизации, применяемые в автоматизированном проектировании, должны отвечать ряду общих требований, среди которых необходимо назвать их способность находить приближение к точке глобального экстремума функции цели в условиях действия ограничений с учетом особенностей математических моделей проектируемых объектов, приемлемость затрат на решение практических задач, простоту настройки соответствующих алгоритмов и программных средств на эффективное применение.

Для решения всей совокупности задач принятия проектных решений, как правило, не удается сформировать единую оптимизационную процедуру. Поэтому требуется некоторая декомпозиция общей многоаспектной задачи оптимизации.

На первом этапе оптимизации, характеризующем недостаточностью информации о проектируемом объекте, решаются задачи поиска аналогов и вхождения в допустимую область, которые характеризуются целевой функцией, представляющей собой некоторую зависимость от степени нарушения требований технического задания по основным рабочим показателям для конкретного варианта проекта. Целью первой из названных задач является минимизация указанной функции на конечном

множестве описаний ранее выполненных проектных разработок. Решение второй подзадачи состоит в определении допустимых вариантов проекта, для которых выполняются требования технического задания (ТЗ) по уровню основных показателей.

Вторую группу составляют задачи параметрической оптимизации ранее найденных допустимых вариантов проекта (прототипов). В общем случае здесь принимается во внимание группа технико-экономических показателей качества функционирования проектируемого объекта и решается задача многокритериальной оптимизации, результатом которой является определение множества эффективных проектных решений. В особую подгруппу необходимо выделить задачи оптимизации параметров управления, а также совместной оптимизации внутренних параметров объекта и управляющих воздействий. Критериями оптимальности в данном случае считаются функционалы, характеризующие быстродействие или энергетические показатели.

Определение допусков на параметры представляет собой частную задачу стохастической оптимизации и имеет целью минимизацию некоторого экономического критерия, включающего составляющие затрат на производство объекта, связанные с обеспечением требуемого качества изготовления.

Выделение таких формально замкнутых локальных задач оптимизации требует организации итерационных процедур их совместного решения в составе комплексного алгоритма принятия проектных решений.

АЛГОРИТМЫ ПОИСКА АНАЛОГОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

Проектирование электротехнических и электроэнергетических объектов различного назначения является традиционной областью инженерной деятельности, в которой накоплен значительный опыт разработок, концентрируемый в рекомендациях по выбору различных атрибутов проекта, в описаниях ранее выполненных разработок изделий, узлов, деталей, в типовых конструкторских приемах и т.д. В ряде случаев необходимо выполнять проектные работы при жестких требованиях по унификации и преемственности по отношению к ранее созданным изделиям. Поэтому целесообразно в начале проектирования обратиться к информации, характеризующей опыт разработок аналогичного назначения. Удачно выбранные аналоги позволяют существенно сократить неопределенность, присущую задачам формирования облика проектируемого объекта, насыщают достоверной входной информацией применяемые математические модели и алгоритмы анализа рабочих показателей. Кроме того, уже в процессе поиска аналогов можно с достаточно высокой степенью достоверности оценить выполнимость требований начального варианта ТЗ и наметить рациональные пути согласования требований внешнего и возможностей внутреннего проектирования.

Техническое задание на проектирование может содержать разнообразные требования, основными

из которых являются количественно определенные ограничения по уровню рабочих показателей объекта и ограничения ресурсов, представленных проектировщику для достижения заданного уровня показателей.

Требования ТЗ могут быть выражены, как правило, в виде нестрогих односторонних неравенств

$$\alpha_j y_j \leq \alpha_j a_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad (8.3)$$

$$\alpha = \begin{cases} -1 & \text{при } y_j \geq a_j; \\ 1 & \text{при } y_j < a_j, \end{cases}$$

где y_j — некоторый рабочий показатель объекта, входящий в состав ТЗ; a_j — ограничение на изменение показателя y_j , которое может задаваться в виде максимального $y_{j \max}$ или минимального $y_{j \min}$ допустимого уровня.

Оперируя совокупностью количественно определенных требований ТЗ, можно организовать алгоритм автоматизированного поиска аналогов среди близких по назначению объектов, описания которых включают среди прочих данных и значения основных рабочих показателей. Однако с большой долей вероятности следует ожидать, что среди ранее выполненных разработок не будет обнаружено ни одного объекта, в полной мере удовлетворяющего всем требованиям ТЗ на новый объект. Поэтому необходимо предварительно проанализировать начальный вариант ТЗ и определить относительную важность включенных в него требований, пути и сложность их выполнения. Здесь необходимо учитывать назначение проектируемого объекта и особенности его применения в составе более сложной системы.

При поиске аналогов в первую очередь требуется выполнить ограничения ТЗ по ресурсам и наиболее важным, рабочим показателям, по другим, менее важным показателям можно допустить некоторое ослабление требований, что позволяет расширить количество объектов, которые могут быть приняты в качестве аналогов. Тем самым увеличивается вероятность успешного поиска.

Для формализованного представления задачи поиска аналогов при допущении, что требования на показатели объекта могут выполняться нестрого, целесообразно воспользоваться понятиями нечетких множеств¹ и базирующихся на них методах нечеткого математического программирования. Тогда решаемая задача принятия проектных решений может быть представлена следующим образом.

Пусть на множестве векторов рабочих показателей $Y(\vec{y} \in Y)$ задано нечеткое множество ограничений $G(\vec{y}, \mu_G(\vec{y}))$, в дальнейшем именуемых основными, на множестве векторов

параметров $X(\vec{x} \in X)$ — нечеткое множество ограничений $S(\vec{x}, \mu_S(\vec{x}))$, которые назовем вспомогательными. Тогда нечеткое множество допустимых вариантов проекта D , т.е. множество вариантов, удовлетворяющих указанным нечетким ограничениям, определяется как пересечение множеств S и G имеет функцию принадлежности

$$\mu_D(\vec{x}) = \min \{ \mu_S(\vec{x}), \mu_{\bar{G}}(\vec{x}) \}, \quad (8.4)$$

где $\bar{G}$ — прообраз нечеткого множества G в X ; $\mu_{\bar{G}}(\vec{x})$ — соответствующая функция принадлежности, определяемая с учетом того, что $\vec{y} = \vec{f}(\vec{x})$, как $\mu_{\bar{G}}(\vec{x}) = \mu_G(\vec{f}(\vec{x}))$.

Таким образом, в качестве проектных решений условимся принимать варианты проекта, одновременно удовлетворяющие основным и вспомогательным ограничениям, задаваемым соответственно функциями принадлежности $\mu_G(\vec{y})$ и $\mu_S(\vec{x})$.

В этих условиях задача поиска аналогов проектируемого объекта состоит в выборе из множества допустимых вариантов проекта, удовлетворяющих условию (8.4), некоторого подмножества D' , объекты которого в максимальной степени отвечают требованиям ТЗ.

При этом важным свойством аналогов является строгое выполнение вспомогательных ограничений, определяемых в основном технологическими требованиями к изготовлению деталей и узлов, т.е. для них должно выполняться условие

$$\mu_S(\vec{x}) = 1. \quad (8.5)$$

Поскольку поиск аналогов производится на множестве описаний реально существующих объектов, условие (8.5) в данном случае выполняется автоматически, что обеспечивает для найденных аналогов применимость и исходную адекватность всей совокупности математических моделей физических процессов в проектируемом объекте.

При поиске аналогов в зависимости от важности выполнения требований ТЗ по каждому рабочему показателю могут задаваться уступки b_j , позволяющие расширить границы области поиска и задающие тем самым нечеткое ограничение на показатели. Функции принадлежности показателей y_j нечетким ограничениям μ_{G_j} при этом могут быть сформированы, например, в виде

$$\mu_{G_j}(y_j) = \begin{cases} [a_j(a_j - y_j) + b_j] / b_j & \text{при } a_j y_j \geq a_j a_j; \\ 1 & \text{при } a_j y_j < a_j a_j. \end{cases} \quad (8.6)$$

При этом функции принадлежности будут изменяться от нуля при нахождении рабочих показателей на границе допустимой области, задаваемой с учетом уступок, до единицы при выполнении четких ограничений, указываемых в ТЗ. Принцип формирования функции принадлежности иллюстрируется на рис. 8.2. Таким образом, задание функций принадлежности позволяет ввести еди-

¹ Нечетким множеством S в X принято называть совокупность пар вида $(x, \mu_S(x))$, где $x \in X$, а μ_S — функция $x \rightarrow [0, 1]$, называемая функцией принадлежности нечеткому множеству S . Значение $\mu_S(x)$ для конкретного элемента множества X характеризует степень принадлежности этого элемента нечеткому множеству S .

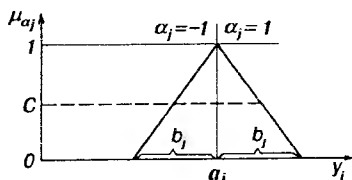


Рис. 8.2. К определению функций принадлежности

ную меру степени нарушения ограничений по различным показателям и тем самым формализовать оценку различных вариантов проекта.

После задания функций принадлежности в виде (8.6) необходимо указать их приемлемый уровень $0 \leq C \leq 1$ и просмотреть описания всех объектов, находящихся в составе соответствующей базы данных. Условие принадлежности конкретного объекта множеству аналогов определяется как

$$C \leq \mu_G(\vec{y}) =$$

$$= \min \{ \mu_{G1}(y_1), \dots, \mu_{Gj}(y_j), \dots, \mu_{Gm}(y_m) \} \leq 1, \quad (8.7)$$

где $\mu_{Gj}(y_j)$ — функция принадлежности нечеткому множеству ограничений G_j по j -му рабочему показателю.

При поиске аналогов необходимо предусмотреть возможности регулирования количества найденных объектов, что может быть достигнуто изменением значений уступок b_j и минимального уровня общей функции принадлежности C . Естественно, что не следует исключать и возможность определения в процессе поиска аналогов объектов, полностью удовлетворяющих требованиям ТЗ, т.е. прототипов, для которых выполняются условия

$$\mu_{Gj}(y_j) = 1, \quad j = \overline{1, m}. \quad (8.8)$$

Также возможны случаи, когда разумное расширение границ поиска аналогов не приводит к положительным результатам, что может свидетельствовать о физической нереализуемости требований ТЗ или об отсутствии объектов, близких по назначению и функциональным свойствам к проектируемому, в составе базы данных. В первом случае необходимо предусмотреть действия по изменению требований ТЗ, а во втором — дать возможность проектировщику самому синтезировать первоначальный вариант проекта и оценить его пригодность в качестве аналога по результатам автоматизированных проектных и проверочных расчетов.

Реализация предложенного алгоритма предполагает непосредственное участие проектировщика в задании различных вариантов уступок, выборе объектов для дальнейшей проработки, определении входных данных для проведения проверочных и проектных расчетов.

Рассмотренный алгоритм поиска аналогов позволяет в первом приближении определить целесообразное сочетание типа и конструктивной схемы, а также полный набор значений параметров, характеризующих проектируемый объект, в том числе относительно не только небольшой группы

параметров оптимизации, но и параметров, значения которых задаются на основе опыта проектирования, стандартов и могут оставаться постоянными в процессе проектирования.

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОТИПОВ

Перед тем, как начать собственно параметрическую оптимизацию проектируемого объекта, необходимо убедиться в существовании четко допустимых проектных решений, т.е. вариантов проекта, полностью удовлетворяющих требованиям ТЗ. Целесообразность решения задачи определения прототипов состоит в подтверждении совместности заданных ограничений с уровнем рабочих показателей объекта. Если найти такие варианты не удастся, то не имеет смысла проводить и оптимизационные расчеты. Следует еще раз проверить правильность и обоснованность задания ограничений, а также оценить правомерность выбора аналогов.

Начальными точками поиска вариантов проекта, в полной мере удовлетворяющих четким ограничениям по уровням рабочих показателей, являются данные найденных аналогов $\vec{x}_{ak}$, где $k = \overline{1, N}$ — номера аналогов. При этом на каждом шаге поиска необходимо стремиться к уменьшению невязки между требованиями ТЗ и текущими значениями рабочих показателей и обеспечивать четкое выполнение совокупности вспомогательных ограничений, т.е. целевая функция в данном случае может быть определена в виде

$$F_p(\vec{x}) = \sum_{j=1}^m \text{mod} [y_j(\vec{x}) - a_j] \quad (8.9)$$

представляющем собой сумму модулей отклонений рабочих показателей y_j от требуемого уровня a_j . Тогда задача определения прототипов состоит в минимизации функции (8.9), т.е.

$$F_p(\vec{x}) = \min \sum_{j=1}^m \text{mod} [y_j(\vec{x}) - a_j] \quad (8.10)$$

при четком выполнении вспомогательных ограничений во всех точках поиска, т.е. $\vec{x}^l: \mu_S(\vec{x}^l) = 1$, где $l = \overline{1, r}$ номера рассматриваемых вариантов проекта.

Задачу (8.10) целесообразно определить в терминах нечеткого математического программирования как задачу поиска варианта проекта, обладающего максимальным значением общей функции принадлежности нечеткому множеству ограничений G :

$$\mu_G(\vec{y}) = \max_{\vec{x} \in S} \min \{ \mu_{G1}(y_1), \dots, \mu_{Gm}(y_m) \}. \quad (8.11)$$

При этом в качестве начальных точек используются данные аналогов. Условием окончания поиска является получение первого варианта проекта $\vec{y}^P$, удовлетворяющего условию

$$\mu_G(\vec{y}^P) = 1. \quad (8.12)$$

В качестве изменяемых атрибутов в процессе определения прототипов, кроме параметров, могут рассматриваться также тип и конструктивная схе-

ма аналогов, представляемые на соответствующем параметрическом базисе. Для решения задачи (8.11) принципиально могут быть использованы алгоритмы различных методов нелинейной оптимизации. В частности, при последовательном рассмотрении групп параметров с учетом их малочисленности и возможной дискретности части из них целесообразно обратиться к алгоритмам перебора и покоординатного поиска.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

После получения некоторого количества прототипов можно перейти собственно к решению задачи параметрической оптимизации, рассматривая каждый прототип в качестве начальной точки. В общем случае задачи оптимизации технических объектов необходимо решать с учетом их реального многокритериального характера. При этом качество принимаемого проектного решения оценивается уже не одним числом, а вектором из k чисел, каждое из которых является значением соответствующей целевой функции

$$F_i(x_1, \dots, x_n), \quad i = \overline{1, k}.$$

Поскольку частные функции цели $F_1, \dots, F_k$ могут отражать качественно различные функциональные свойства оптимизируемого объекта, оказывается невозможным сравнивать варианты проекта без привлечения дополнительных критериев предпочтения, позволяющих сопоставлять уровни, достигаемые по таким разнородным показателям качества. Применение безусловных критериев предпочтения позволяет выделить среди рассматриваемых вариантов проекта подмножество эффективных альтернатив, включающее варианты, не улучшаемые одновременно по нескольким частным критериям оптимальности. Ранжирование проектных решений среди эффективных альтернатив может быть выполнено проектировщиком с привлечением неформализуемых условных критериев предпочтения.

Один из наиболее часто применяемых подходов к решению многокритериальной задачи оптимизации состоит в сведении ее к однокритериальной посредством агрегирования в одном критерии нескольких показателей качества со своими весовыми коэффициентами или путем выделения наиболее важного показателя в качестве единственного критерия с переводом остальных показателей в разряд ограничений.

Сущность другой группы методов многокритериальной оптимизации состоит в последовательном выявлении предпочтений одновременно с получением и исследованием допустимого множества альтернатив. В целом этот подход отличается большей объективностью при сопоставлении различных вариантов проекта одновременно по нескольким показателям качества. Наибольшее распространение в проектировании технических устройств и систем получили методы равномерного сканирования выделенной области в пространстве параметров оптимизации в целях составления и упорядочения таблиц испытаний по достигаемым

уровням частных критериев. В другую широко известную группу входят различные модификации метода последовательных уступок.

Рассмотрим более подробно алгоритм многокритериальной оптимизации, объединяющий особенности методов сканирования и последовательных уступок и предусматривающий нормирование частных критериев с использованием понятий нечеткого математического программирования.

В соответствии с этим алгоритмом выполняются следующие действия:

1. С применением одного из известных алгоритмов пассивного поиска (упорядоченное или случайное сканирование, ЛП-поиск) синтезируется ряд вариантов проекта, равномерно рассеянных в пространстве параметров оптимизации $\vec{x} \in D$. Для каждого из этих вариантов определяются значения основных рабочих показателей $y_1, \dots, y_m$, и затем строятся диаграммы распределения вариантов проекта в координатах попарно перебираемых показателей $y_i, y_j, i \neq j$. В результате анализа получаемых диаграмм можно определить группу независимых показателей, которые целесообразно в дальнейшем рассматривать как частные критерии оптимальности. Для количественной оценки зависимости между парами показателей можно определить значение коэффициента корреляции

$$r(y_i, y_j) = \frac{My_i y_j - My_i My_j}{\sqrt{Dy_i Dy_j}}, \quad (8.13)$$

где My_i, My_j — математические ожидания показателей y_i и y_j соответственно; Dy_i, Dy_j — дисперсии указанных показателей, причем $Dy = My^2 - (My)^2$.

Если y_i и y_j независимы, то $r(y_i, y_j) \rightarrow 0$, при $r(y_i, y_j) \rightarrow 1$ можно считать, что между y_i и y_j существует зависимость, близкая к линейной, и один из показателей может быть исключен из рассмотрения.

2. Из определенной на предыдущем шаге совокупности независимых рабочих показателей объекта выбирается основная функция цели F_1 и производится его оптимизация по F_1 при учете только вспомогательных ограничений, т.е. при выполнении условия $\vec{x} \in S$. Следует отметить, что определение первого приближения к решению данной задачи может быть выполнено при анализе данных, полученных на первом шаге поиска. Здесь же производится уточнение ранее найденного варианта проекта.

3. Вводится некоторая уступка ΔF_1 относительно найденного на предыдущем шаге экстремального значения F_1^* основного критерия, и объект оптимизируется поочередно по всем неосновным критериям при условии, что ограничения на другие критерии, кроме основного, не принимаются во внимание. Кроме того, для найденных при таких условиях объектов должно выполняться условие

$$\vec{x}^*(j) \in S, \quad j = \overline{2, k}.$$

4. Результаты, полученные на предыдущих шагах, используются для нормирования частных критериев и построения соответствующих функций принадлежности вариантов проекта множеству эффективных альтернатив. Используется следующий способ нормирования: лучшему значению F_j^j , полученному при оптимизации по данному критерию, ставится в соответствие значение функции принадлежности, равное единице, а худшему F_j^x значению — нуль. В качестве худшего значения основного критерия принимается результат второго шага рассматриваемого алгоритма, ухудшенный на ΔF_1 . Тогда, например, линейная функция принадлежности по j -му критерию определяется как

$$\mu(F_j) = (F_j^x - F_j^j) / (F_j^x - F_j^j), \quad (8.14)$$

где F_j^j — некоторое текущее значение критерия.

5. Формируется общая функция принадлежности варианта проекта $\tilde{x}$ множеству эффективных альтернатив

$$\mu[\tilde{F}(\tilde{x})] = \min_{\tilde{x} \in D} \{ \mu(F_1), \dots, \mu(F_k) \}. \quad (8.15)$$

6. При заданной уступке ΔF_1 и сформированной функции (8.15) определяется одна из эффективных альтернатив $\tilde{x}^*$, исходя из условия

$$\mu[\tilde{F}(\tilde{x}^*)] = \max_{\tilde{x} \in D} \min \{ \mu(F_1), \dots, \mu(F_k) \}. \quad (8.16)$$

Для решения сформулированной задачи могут, например, последовательно увеличиваться задаваемые уровни общей функции принадлежности (8.15), и в этих условиях осуществляется поиск варианта проекта $\tilde{x}^*(l)$, удовлетворяющий условию

$$\mu[\tilde{F}(\tilde{x}^*(l))] = c_l, \quad (8.17)$$

где c_l — требуемый уровень функции принадлежности.

Поиск может быть выполнен с применением совокупности алгоритмов нелинейной оптимизации и заканчивается при невозможности на очередном l -м шаге найти ни одного варианта проекта, удовлетворяющего условию (8.17).

Для определения других эффективных проектных решений необходимо изменить ранее заданное значение уступки ΔF_1 и (или) вид функции принадлежности (8.14), т.е., например, вместо линейной задать квадратическую зависимость. Естественно, что смена основного критерия также приводит к получению иных эффективных вариантов проекта.

В целом рассмотренный алгоритм оказывается более оптимальным и позволяет определять приближения к эффективным проектным решениям с большей точностью, чем это делается с использованием пассивного поиска, особенно при значительной размерности области поиска в пространстве параметров оптимизации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ

В процессе проектирования необходимо учитывать реально существующий разброс значений рабочих показателей, обусловленный случайными технологическими и эксплуатационными факторами. Решение этой проблемы прежде всего связывается с заданием допусков на размеры деталей и узлов, характеристики применяемых материалов и другие параметры.

Определение допусков на параметры является заключительным шагом в процессе принятия проектных решений и дает возможность получить необходимые входные данные для организации технологической подготовки производства, так как назначение допусков позволяет определить количество и последовательность операций механической обработки, необходимость пооперационного контроля параметров, селективного подбора деталей и узлов и пр.

Задача определения допусков на параметры обладает некоторыми особенностями в сравнении с ранее рассмотренными задачами параметрической оптимизации. Прежде всего требуется определить не фиксированные значения параметров, а допустимые диапазоны их изменения, т.е. некоторую область в пространстве параметров. Кроме того, значения параметров в пределах допусков являются случайными величинами, а значения допусков на ряд параметров изменяются дискретно.

Учитывая названные особенности задачи определения допусков на параметры, дадим ее формулировку, предположив, что на предыдущем шаге оптимизации параметры объекта были зафиксированы на некотором уровне $\tilde{x}^*$ в области допустимых значений S . Тогда задача определения допусков состоит в нахождении таких изменений параметров $\Delta \tilde{x}^*$, возникающих под действием технологических и эксплуатационных факторов, что

$$F(\tilde{x}^*, \Delta \tilde{x}^*) = \min F(\tilde{x}^*, \Delta \tilde{x}^*), \quad (8.18)$$

где $F(\tilde{x}^*, \Delta \tilde{x}^*)$ — технико-экономический критерий, в соответствии с которым найденные значения допусков должны обеспечить минимальный уровень затрат на производство и эксплуатацию объекта

$$F(\tilde{x}^*, \Delta \tilde{x}^*) = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\Delta x_i}, \quad (8.19)$$

где b_i — коэффициенты, учитывающие степень возрастания затрат труда при ужесточении допусков для каждого параметра; n — количество параметров.

При этом найденные значения $\Delta \tilde{x}^*$ не должны приводить к нарушению условия

$$\tilde{x}^* + \Delta \tilde{x}^* \in S \quad (8.20)$$

а вероятность нахождения значений рабочих показателей y_j , $j = 1, m$ вне области допустимых значений G не должна быть более наперед заданного уровня P_6 , т.е.

$$P(\exists \in G) \geq 1 - P_6. \quad (8.21)$$

В данном случае задание уровня вероятного брака $P_6 = 0$ нецелесообразно, так как требование, чтобы все экземпляры изделия четко удовлетворяли ТЗ по уровню разброса рабочих показателей, приводит к неоправданному ужесточению допусков на параметры.

8.3. АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

ОСОБЕННОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Одной из основных особенностей задач конструирования является их относительно большая трудоемкость в сравнении с расчетными задачами. Например, длительность проработки конструкции различных типов электромеханических устройств и неавтоматизированного выполнения рабочих чертежей может быть в пять—десять раз выше, чем длительность расчетных операций.

Наряду с этим целый ряд операций по преобразованию и представлению геометрической информации носит рутинный, нетворческий характер. Доля таких операций в конструировании чрезвычайно велика: в среднем не более 10 % времени тратится на поиск решений, все остальные усилия приходится прилагать для представления найденных решений в виде чертежей, спецификаций и пр. Относительная простота частичной формализации этих задач при весьма высокой трудоемкости объясняет повышенное внимание к их решению.

Ориентация средств обеспечения автоматизированного проектирования на пользователя-непрограммиста, а также потребность повышения производительности труда конструкторов привели к созданию и развитию прикладных систем автоматизации чертежных работ, среди которых можно назвать системы *Dradon*, *AutoCAD*, *Cherry* и др. Эти и другие аналогичные системы машинной графики позволяют формировать собственные библиотеки графических элементов, которые могут быть в дальнейшем использованы для получения более сложных изображений, а также для оформления чертежей. Над графическими элементами можно производить различные операции (перенос, поворот, масштабирование, повторение, зеркальное отображение и пр.). Кроме того, в этих графических системах предусматривается создание архива полученных конструкторских документов на машинных носителях информации.

Несмотря на значительную трудоемкость графических работ, связанных с документированием проектных решений, сущность конструирования не сводится только к выполнению этих работ. Прежде всего формирование геометрического облика проектируемого объекта или его элементов связывается с необходимостью проведения геометрических, прочностных, деформационных и других расчетов.

Схема типовой процедуры автоматизированного конструирования, объединяющей расчеты и геометрические построения, изображена на рис. 8.3.

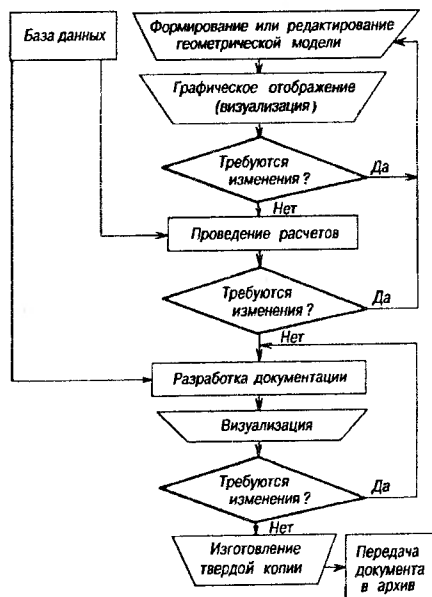


Рис. 8.3. Схема типовой процедуры конструирования

Здесь предусматривается, что база данных включает в себя описания геометрических моделей элементов конструкции, из которых могут формироваться более сложные модели, а также данные, необходимые для выполнения расчетов. После окончания расчетно-геометрической процедуры формирования конструкции ее описание помещается в базу данных. В дальнейшем это описание может послужить основой для разработки конструкторской документации, которая, в свою очередь, может быть представлена в виде твердой копии с помощью графопостроителя (печатающего устройства) или передана в архив на машинных носителях информации.

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТИПОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основное назначение этой группы алгоритмов состоит в обеспечении геометрических расчетов конструкций сложной формы, для которых нецелесообразно или невозможно прямое (аналитическое) определение таких показателей, как объем, масса, центр массы, моменты инерции, площади поверхностей. Кроме того, при разработке этих алгоритмов необходимо решить проблемы визуализации выполняемых геометрических построений.

При формировании этой группы алгоритмов будем различать общую прямоугольную систему координат, связанную со всей конструкцией, относительно которой определяются такие результирующие показатели, как координаты центра массы, статические моменты и моменты инерции, а также вспомогательные системы координат, связанные с каждым типовым элементом. В общем случае возможно несовпадение начал указанных систем координат и направлений координатных осей, т.е.

произвольное расположение типовых элементов в общей системе координат конструкции.

Определив координаты центра массы i -го элемента x_{ci}' , y_{ci}' , z_{ci}' в системе координат, направления осей которой совпадают с направлениями осей общей системы координат, в дальнейшем необходимо осуществить привязку системы координат типового элемента к началу системы координат конструкции. При этом координаты центра массы типового элемента в системе координат конструкции x_{ci}'' , y_{ci}'' , z_{ci}'' определяются как

$$\begin{aligned}x_{ci}'' &= \|x_{ci}'\| + x_{ni}; \\y_{ci}'' &= \|y_{ci}'\| + y_{ni}; \\z_{ci}'' &= \|z_{ci}'\| + z_{ni},\end{aligned}$$

где x_{ni} , y_{ni} , z_{ni} — координаты привязки вспомогательной системы координат к общей системе координат конструкции.

Для определения общих показателей конструкции необходимо по известным векторам вида

$$\vec{u}_i = (m_i, a_i, I_{x0yi}, I_{y0zi}, I_{z0xi}, x_{ci}', y_{ci}', z_{ci}', x_{ni}', y_{ni}', z_{ni}'),$$

$$i = \overline{1, N},$$

где m_i и a_i — масса и статический момент i -го типового элемента; I_{x0yi} , I_{y0zi} , I_{z0xi} — моменты инерции элемента относительно плоскостей системы координат, связанной с типовым элементом; N — общее число типовых элементов, составляющих конструкцию, получить вектор

$$\vec{U} = (M, A, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, X_c, Y_c, Z_c),$$

где M — масса; A — статический момент; I_{xx} , I_{yy} , I_{zz} — моменты инерции относительно общей системы координат; X_c , Y_c , Z_c — координаты центра масс конструкции.

В алгоритме различаются режимы компоновки конструкции, предусматривающей поэлементный ввод ее описания, и «редактирования» ранее сформированного описания конструкции путем изменения параметров ее элементов, а также добавления, удаления или замены элементов. Все выполненные конструктором действия и результаты соответствующих расчетов отражаются в протоколе расчетногеометрического моделирования, сохраняемом в архиве на машинных носителях информации. Следует также отметить, что в соответствии с принятой методикой геометрические расчеты конструкции должны проводиться поэтапно: сначала определяться показатели конкретного типового элемента, данные которого были введены на этом же шаге работы алгоритма, в системе координат, жестко связанной с элементом, а затем осуществляться его «припасовывание» к ранее сформированной конструкции путем поворотов и параллельных переносов системы координат, а также учета знака «припасовывания», поскольку элемент может не только добавляться к конструкции, но и удаляться из нее.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ

Размерные расчеты являются трудоемкой задачей. Их автоматизация не только позволяет сократить затраты времени, но и делает принципиально возможным определение оптимальных по стоимости допусков на параметры.

Задача анализа или прямая задача расчета размерных цепей состоит в определении значений замыкающих звеньев y_j , $j = \overline{1, m}$, при заданных номинальных значениях составляющих звеньев x_i , $i = \overline{1, n}$. Обратная задача заключается в определении допусков составляющих звеньев при заданных границах изменения замыкающих звеньев.

Математическая модель размерных цепей конструкции указывает на взаимосвязи составляющих звеньев с каждым замыкающим звеном. При этом возможны три варианта: составляющее звено увеличивает замыкающее; составляющее звено уменьшает замыкающее; данное составляющее звено не входит в конкретную размерную цепь.

Тогда структуру совокупности размерных цепей конструкции можно представить в виде матрицы $\|a_{ij}\|$, элементы которой в первом из названных вариантов принимают значение «1», во втором — «-1», а в третьем — «0». А структура математической модели размерных цепей при этом будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Для обеспечения работоспособности представленной модели в решении задачи анализа размерных цепей необходимо кроме матрицы $\|a_{ij}\|$ задать номинальные значения x_{in} и предельные отклонения δ_{min} , δ_{max} по каждому составляющему звену.

Принято различать линейные, плоскостные и пространственные размерные цепи. В состав линейных размерных цепей включаются только параллельные звенья. Если возникает необходимость определения значений угла смещения одного элемента по отношению к другому и взаимное положение элементов задано только угловыми размерами, то размерная цепь в этом случае сходна с линейной размерной цепью, но звенья этой цепи представляют собой угловые размеры и могут быть изображены в виде отрезков дуг. Уравнение этой размерной цепи составляется так же, как и уравнение размерной цепи с параллельными звеньями.

Плоскостные размерные цепи принято разделять на цепи с непараллельными звеньями и с угловыми размерами. Пространственные размерные цепи могут быть представлены как некоторые сочетания линейных и плоскостных цепей.

В общем случае представим взаимосвязь замыкающих и составляющих звеньев размерных цепей как

$$y_j = f_j(x_1, \dots, x_n), \quad j = \overline{1, m}.$$

Из этих уравнений могут быть получены выражения для определения средних значений M_{y_j} , верхних и нижних предельных отклонений $\Delta_{y_j}^B$, $\Delta_{y_j}^H$ и допусков δy_j .

Уравнение средних значений замыкающего звена имеет вид

$$M_{y_j} = f_j(Mx_1, \dots, Nx_i, \dots, Mx_n),$$

где M_{y_j} — математическое ожидание замыкающего звена; Mx_i , $i = \overline{1, n}$ — математические ожидания составляющих звеньев.

Уравнения для верхнего и нижнего предельных отклонений соответственно:

$$\Delta_{y_j}^B = f_j(x_1, \dots, x_n)_{\max} - f_j(x_1, \dots, x_n);$$

$$\Delta_{y_j}^H = f_j(x_1, \dots, x_n)_{\min} - f_j(x_1, \dots, x_n),$$

а уравнение допуска замыкающего звена

$$\delta y_j = f_j(x_1, \dots, x_n)_{\max} - f_j(x_1, \dots, x_n)_{\min}.$$

Конкретный вид представленных уравнений зависит от вида моделируемой размерной цепи и от применяемого метода вычисления значений звеньев размерных цепей. В дальнейшем сосредоточим внимание на линейных размерных цепях, сводимых к единой схеме расчета и нашедших наибольшее применение при конструировании.

В качестве методов анализа размерных цепей нашли применение метод наихудшего случая (максимума-минимума), вероятностный метод и метод статистических испытаний. При расчетах размерных цепей на максимум-минимум целесообразно представить их в виде совокупностей составляющих звеньев, увеличивающих замыкающее звено, и звеньев, уменьшающих замыкающее звено. Тогда выражение для определения номинальных значений звеньев линейной цепи будет иметь вид

$$y_j = M_j - N_j,$$

где M_j — сумма номинальных значений совокупности звеньев, увеличивающих y_j ; N_j — сумма номинальных значений совокупности звеньев, уменьшающих y_j .

Верхнее и нижнее предельные отклонения будут определяться как

$$\begin{aligned} \Delta_{y_j}^B &= y_{j \max} - y_j = (M_{j \max} - N_{j \min}) - (M_j - N_j) = \\ &= \Delta_{M_j}^B - \Delta_{N_j}^H; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{y_j}^H &= y_{j \min} - y_j = (M_{j \min} - N_{j \max}) - (M_j - N_j) = \\ &= \Delta_{M_j}^H - \Delta_{N_j}^B; \end{aligned}$$

уравнение допуска замыкающего звена (уравнение точности):

$$\delta y_j = y_{j \max} - y_{j \min} = \sum_{i=1}^n \delta x_i,$$

где $y_{j \max}$, $y_{j \min}$ — предельные значения замыкающего звена y_j ; δx_i — допуск на i -е составляющее звено размерной цепи.

Теоретическое обоснование применимости вероятностного метода состоит в необходимости учета

малой вероятности совместного появления случайных значений составляющих звеньев на границах допусков. Это позволяет в ряде случаев расширить допуски на составляющие звенья размерных цепей без сколько-нибудь ощутимой потери точности при одновременном уменьшении технологической стоимости.

Математическое ожидание (среднее значение) замыкающего звена в данном случае определяется как

$$M_{y_j} = \sum_{i=1}^n Mx_i,$$

а его среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{y_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2 x_i},$$

где σx_i — среднее квадратическое отклонение i -го составляющего звена:

$$\sigma x_i = \sqrt{Mx_i^2 - (Mx_i)^2}.$$

Среднее квадратическое отклонение составляющего звена можно представить и как

$$\sigma x_i = \delta x_i / 2z_i,$$

где $2z_i$ — число средних квадратических отклонений, характерное для данного распределения вероятностей. Например, для нормального распределения $z = 3$.

Допуски замыкающих звеньев определяются как

$$\delta y_j = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta x_i / 2)^2 K_{zij}^2},$$

где $K_{zij} = Z_j / Z_i$ представляет собой коэффициент приведения распределения случайных значений составляющего звена x_i к распределению случайных значений замыкающего звена y_j .

При допущении, что случайные значения замыкающего звена имеют нормальное распределение, для его предельных отклонений получаем

$$\Delta_{y_j}^B = -\Delta_{y_j}^H = \sqrt{\sum (\delta x_i / 2)^2 K_{zij}^2},$$

а для предельных значений:

$$y_{j \max} = M_{y_j} + \delta y_j / 2; \quad y_{j \min} = M_{y_j} - \delta y_j / 2.$$

Метод статистических испытаний предусматривает прямое воспроизведение процесса испытаний готовой продукции при замене реального объекта математической моделью. С этой целью на входе математической модели формируются взаимно независимые случайные значения входных параметров (в данном случае — значения составляющих звеньев размерной цепи), которые после преобразования дают соответствующие значения замыкающих звеньев. В результате проведения некоторого количества таких «испытаний» на входе модели размерной цепи необходимо получить заданные распределения вероятностей по каждому составляющему звену. Обработка статистических данных по ожидаемому разбросу значений замыкающих

звеньев позволяет построить соответствующие эмпирические распределения вероятностей и получить полную статистическую информацию о характере распределения. Например, можно определить в процентном отношении долю продукции, соответствующей техническим условиям, или ожидаемый процент брака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 8.1. Джонс Дж.К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986.
- 8.2. Гельмерих Р., Швиндт П. Введение в автоматизированное проектирование: Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1990.
- 8.3. Вермишев Ю.Х. Основы автоматизации проектирования. М.: Радио и связь, 1988.

8.4. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987.

8.5. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио и связь, 1984.

8.6. Орлов И.Н., Маслов С.И. Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств. М.: Энергоатомиздат, 1989.

8.7. Гардан И., Люка М. Машинная графика и автоматизация конструирования. М.: Мир, 1987.

8.8. Бергхаузер Т., Шлив П. Система автоматизированного проектирования AutoCAD. М.: Радио и связь, 1989.

8.9. Стрелец А.А., Фирсов В.А. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. М.: Машиностроение, 1988.

Раздел 9

МИКРОПРОЦЕССОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ

9.1. Терминология, основные определения и понятия	178	9.5. Средства разработки программного обеспечения	186
9.2. Структура микропроцессорных систем	180	9.6. Отладка микропроцессорных систем ..	187
9.3. Алгоритмы обработки информации в микропроцессорных системах	182	9.7. Стандартные средства микропроцессорной техники	188
9.4. Программное обеспечение микропроцессорных систем	185	Список литературы	194

9.1. ТЕРМИНОЛОГИЯ, ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

В настоящем разделе даются исходные сведения о микропроцессорах. Эти сведения не могут заменить существующую обширную литературу, однако они позволяют познакомиться с основными понятиями и проблемами освоения микропроцессорной техники. Кроме того, в разделе содержатся сведения о серийно выпускаемых микропроцессорных средствах. Таким образом, раздел служит путеводителем по изделиям микропроцессорной техники, литературным и справочным данным.

Микропроцессор — это программно-управляе-

мое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации, выполненное в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС) [9.1]. БИС может иметь 24, 40, 48, 64 вывода, на которые подаются извне или формируются процессором логические (цифровые) сигналы. Основные характеристики отечественных микропроцессорных БИС приведены в табл. 9.1. Микропроцессор является основным узлом микропроцессорной системы (МПС), которая предназначена для автоматизации вычислительных процессов и решения задач управления.

Стандартная конфигурация МПС (рис. 9.1) содержит микропроцессор (МП), постоянное и

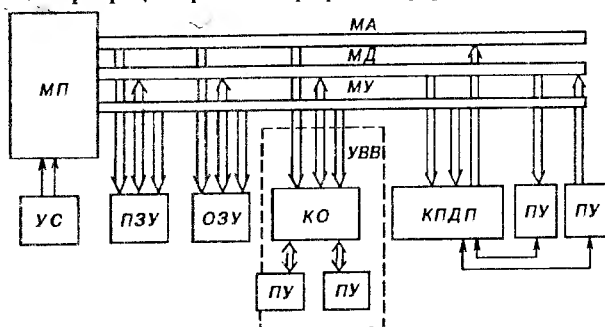


Рис. 9.1. Структурная схема микропроцессорной системы

Т а б л и ц а 9.1. Отечественные микропроцессорные комплекты

МП комплект	Разрядность, архитектура	Базовая технология	Число БИС	Система команд*
K580	8-однокристалльный МП	л-МДП	8	K580
K581	16-многокристалльный односекционный МП	л-МДП	4	Э60
KP582	4m-многокристалльный многосекционный МП	и ² Л	2	микроКом
K583	8m-многокристалльный многосекционный МП	и ² Л	4	микроКом
	4m-многокристалльный многосекционный МП	и ² Л	5	микроКом
K586	16-однокристалльный МП	л-МДП	4	K580
K587	4m-многокристалльный многосекционный МП	КМДП	4	микроКом
K588	16-многокристалльный односекционный МП	КМДП	8	Э60
K589	2m-многокристалльный многосекционный МП	ТТЛШ	8	микроКом
K1800	4m-многокристалльный многосекционный МП	ЭСЛ	8	микроКом
K1801	16-однокристалльная микроЭВМ	л-МДП	3	Э60
K1802	8m-многокристалльный многосекционный МП	ТТЛШ	11	микроКом
K1804	4m-многокристалльный многосекционный МП	ТТЛШ	4	микроКом
K1809	16-многокристалльный односекционный	л-МДП	6	микроКом
K1810	16-однокристалльный МП	л-МДП	9	K1810
KM1813	8-однокристалльная микроЭВМ с аналоговым вводом	л-МДП	4	микроКом
K1815	8-, 16-, 32-однокристалльный МП	ТТЛШ	7	микроКом
K1816BE48	8-однокристалльная микроЭВМ	л-МДП	4	K1816BE48
K1816BE51	8-однокристалльная микроЭВМ	л-МДП	4	K1816BE51
K1820	4-однокристалльная микроЭВМ	л-МДП	2	K1820
K1821	8-однокристалльный МП	к-МОП	3	K580

* МикроКом — программирование на уровне микрокоманд; Э60 — Ассемблер микроЭВМ «Электроника-60»; остальное — Ассемблер указанного типа МП.

оперативное запоминающие устройства (ПЗУ и ОЗУ), узел синхронизации (УС), устройства ввода и вывода информации (УВВ) [9.2].

С известной степенью условности различают два класса микропроцессорных систем: микроЭВМ и микропроцессорные контроллеры. Первые предназначены, главным образом, для вычислительных работ, требующих высокой производительности.

Микроконтроллерами принято называть управляющие системы, зачастую встраиваемые в объект управления; они характеризуются сравнительно малым объемом памяти, специальным набором команд, наличием встроенных устройств ввода-вывода.

В качестве устройств ввода-вывода в МПС могут использоваться аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), фотосчитывающие устройства, средства отображения и регистрации информации (дисплеи, печатающие устройства). УВВ служат для связи МПС с периферийными устройствами (ПУ); управление передачей информации осуществляется контроллером обмена (КО).

Каждая из составных частей МПС — запоминающие устройства, различные типы устройств ввода-вывода — должна быть связана с микропроцессором. Принятая магистральная система связей обеспечивает большую гибкость МПС, возможность ее модификации и наращивания. Функционально различают три вида сигналов для связи модулей МПС. Эти сигналы представляют собой обрабатываемую информацию (данные), коды источников или получателей этой информации (адрес), определяют способ взаимодействия МП с другими модулями МПС (сигналы управления). Каждому виду сигналов соответствует одноименная магистраль. Различают магистраль данных (МД), магистраль адреса (МА) и магистраль управления (МУ).

Данные — цифровые сигналы, представляемые параллельным кодом по нескольким линиям, образующим магистраль данных. Эта магистраль двунаправленная. Разрядность ее различна для различных МП и может составлять 8, 16 или 32 бита [9.2, 9.3, 9.8]. Для распространенных в настоящее время МП серий К580, К1821 и однокристалльных микроЭВМ серии К1816 она составляет 8 двоичных разрядов, для МП серии К1810 — 16 двоичных разрядов. Восемьразрядное двоичное слово данных называют байтом, один байт позволяет передать одно из $2^8 = 256$ различных сообщений или одно из чисел от 0 до 255. При необходимости расширения диапазона передаваемых сообщений (например, в целях повышения точности) можно использовать двухбайтовые слова. Поскольку восьмиразрядный МП обрабатывает байты поочередно, быстродействие МПС при переходе на двойную длину слова существенно снижается. В 16-разрядных МП успешно совмещаются быстродействие и точность (серия К1810).

Для обращения к определенной области памяти или определенному УВВ его необходимо адресовать, т.е. обратиться именно к этому источнику

(или приемнику) информации. Это достигается тем, что на магистраль адреса МП выставляет адрес устройства, выбранного для обмена данными. Разрядность магистрали адреса должна быть достаточной для обращения к любой из ячеек памяти или УВВ. В МП серии К580 и серии К1821 магистраль адреса 16-разрядная, т.е. адресуется $2^{16} = 65\,536$ ячеек памяти, в МП серии 1810 разрядность магистрали адреса — 20. В целях более эффективного использования выводов БИС, в некоторых МП данные и адрес поступают на одни и те же выводы МП, образуя мультиплексную магистраль адреса-данных (серия К1821).

Магистраль управления служит для передачи сигналов управления, которыми МП обменивается с другими модулями системы. Сигналы управления определяют характер, направление и вид информации, передаваемой по магистралям адреса и данных.

9.2. СТРУКТУРА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Все модификации МПС и выполненные на их основе устройства управления содержат обязательное ядро и вариативную часть. Ядро включает собственно МП, ПЗУ, ОЗУ и УС (см. рис. 9.1). Вариативная часть включает программируемые КО с различными периферийными устройствами: клавиатурой, дисплеем, датчиками технологической информации, исполнительными устройствами. Назначение контроллера прямого доступа к памяти (КПДП) поясняется ниже.

Последовательность работы узлов системы следующая: начало выполнения программы связано с обращением к ПЗУ. Первое считанное слово всегда является кодом команды, оно настраивает МП на выполнение определенной операции над данными и указывает, откуда эти данные должны быть получены. Если данные хранятся в ПЗУ, ОЗУ или регистрах МП, то следующими операциями МП считывает их, производит над ними необходимые действия и определяет место хранения результата. Если команда предписывает использование данных одного из ПУ, то соответствующий КО получает информацию о том, в каком режиме он должен работать (прием или передача) и команду начала обмена. Далее КО записывает данные из ПУ во внутренний узел хранения — регистр КО и по команде ввода МП выдает их на магистраль данных. Аналогично осуществляется вывод данных из МП из запоминающего устройства в ПУ: производится выбор соответствующего ПУ, устанавливается режим контроллера «передача», после чего МП по магистрали данных передаст информацию в контроллер, который пересылает их в соответствующее ПУ. Роль КО в простейшем случае состоит в буферизации данных, их хранении в течение времени, необходимого для пересылки и использования. Однако на КО часто возлагаются более сложные функции. Если ПУ расположено далеко от управляющей МПС, то его связывают посредством двухпроводной линии для последовательной передачи данных. Преобразова-

ние параллельного кода данных в последовательный и обратно осуществляется последовательным периферийным адаптером. Поскольку последовательный обмен требует большего времени, КО должен выполнять следующие функции при выводе информации: получить от МП информацию о предстоящем режиме работы, принять и запомнить передаваемое слово, получить сигнал о начале передачи, сообщить МП об окончании передачи. Контроллеры последовательного обмена работают парами — один на передаче, другой на приеме.

Для операций с аналоговыми сигналами, которые требуют применения АЦП и ЦАП, используются соответствующие контроллеры. Вывод аналоговой информации предполагает запись слова данных в регистр контроллера ЦАП, преобразование этого слова в аналоговую выходную величину ЦАП. Сложнее осуществляется обратное преобразование — АЦП: по команде системы производятся выборка и хранение аналоговой величины на время, необходимое для выполнения преобразования, затем осуществляется алгоритм преобразования ее в код, например, методом суммирования взвешенных величин, хранение полученного результата в буферном регистре КО, результат преобразования может быть считан МПС. Контроллеры АЦП и ЦАП часто выполняют функции согласования разрядности МП с разрядностью цифровых данных. Так, 10-разрядный ЦАП требует двух слов данных форматом один байт каждое, причем одно слово используется неполностью.

Контроллеры программно-управляемого обмена необходимы для организации передачи информации по инициативе МП под управлением программы. Однако такой обмен не может удовлетворить все потребности. Часто возникает необходимость общения МПС с ПУ по инициативе ПУ. При выполнении некоторого условия (нажатие клавиши, появление логического сигнала о превышении порогового уровня) ПУ обращается к МП с запросом на прерывание выполняемой в данный момент программы. Если прерывания не запрещены программой, МП приостанавливает выполнение текущей программы, запоминает промежуточные результаты, чтобы в последующем иметь возможность воспользоваться ими, и разрешает прерывание. Это означает, что ПУ, запросившее прерывание, должно быть опрошено по соответствующей программе обработки прерывания. По выполнении этой программы система возвращается к прерванной текущей работе [9.2, 9.9, 9.10].

Задача обработки прерывания усложняется, если имеется несколько ПУ, которые требуют обработки по разным программам, а их запросы могут вступать в конфликт и требуют арбитража. Чаще всего для обработки запросов устанавливается система приоритетов. Прием запросов, определение их приоритетов и вызов соответствующей программы обработки осуществляет программируемый контроллер прерываний. Он определяет, какому из одновременно поступивших запросов должен быть отдан приоритет, какова должна быть программа его обработки, как должна реагировать система на

появление новых запросов до завершения обработки предыдущего.

При обоих способах обмена МП с ПУ (программно-управляемый обмен и обработка запросов на прерывание) пересылка данных из ОЗУ в ПУ происходит через регистры МП. В случае необходимости обмена большими массивами информации между ОЗУ и ПУ (запись с диска, вывод большого числа отсчетов при формировании сигнала заданной сложной формы) такой способ передачи обладает недостаточным быстродействием. Вместе с тем, характер обмена допускает непосредственную передачу массивов из ОЗУ в ПУ или обратно, поскольку участия МП для обработки при этом не требуется. Такой обмен получил название прямого доступа к памяти (ПДП). Его организует контроллер ПДП КДПД (рис. 9.1), который обеспечивает передачу данных в заданном направлении между модулями ОЗУ и внешним устройством, причем адреса начала и конца пересылаемого массива зафиксированы в КДПД и они определяют момент завершения передачи. В процессе передачи МП отключается от магистралей, которые захватываются КДПД, а возвращается к управлению программным обменом после окончания процесса пересылки [9.2, 9.9, 9.10].

Помимо трех названных типов КО практически в каждой системе присутствует еще одно программируемое устройство — программируемый таймер. Работа таймера основана на вычитающем счетчике, который загружается числом, пропорциональным требуемой выдержке времени, и считает тактирующие импульсы до обнуления счетчика. Программируемый таймер может работать в нескольких режимах, которые отличаются способами запуска, возможностью циклического повторения заданных режимов, фиксацией состояния счетчика. Программируемый таймер является неотъемлемой частью управляющих устройств, входные и выходные сигналы которых носят временной характер (частота, период, время запаздывания).

После знакомства с КО введем одно из важных и емких понятий в микропроцессорной технике — интерфейс. Интерфейс — сопряжение, устройство сопряжения; однако нельзя сводить его к совокупности аппаратных средств; понятие интерфейса включает в себя и правила сопряжения, т.е. программное обеспечение, включающее в себя команды инициализации, обмен сигналами запроса, разрешения окончания обмена. Все виды контроллеров для программного обмена МПС с ПУ, для обмена по прерываниям, для организации прямого доступа к памяти, а также программируемые таймеры выполняются в виде специализированных БИС — интерфейсных БИС [9.7, 9.8].

Для управления сложными технологическими процессами возникает необходимость в обмене данными между несколькими локальными МПС. Это дает возможность осуществлять более совершенные алгоритмы управления и полнее использовать возможности МПС. Для связи нескольких систем разработаны стандартные магистрали и интерфейсы для сопряжения с различными типами

микропроцессоров. Магистралы содержат линии данных, адреса и управления. Они позволяют соединять группу микропроцессорных систем, образующих сеть. Некоторые типы стандартных магистралей содержат как параллельный, так и последовательный интерфейс. Обмен информацией происходит между двумя устройствами, одно из них является передающим. Принимающим может быть одно или несколько устройств, все остальные должны быть отключены от магистралы. Основные характеристики стандартных интерфейсов, принятых в нашей стране, и их зарубежные аналоги приведены в [9.11].

Многие задачи локального управления не требуют большого объема вычислительных работ и развитой системы ввода-вывода.

Специально для этих задач разработаны однокристалльные микроконтроллеры (серии K1816 и K1820), которые внутри одного кристалла содержат арифметическо-логическое устройство, ПЗУ и ОЗУ ограниченной емкости, несколько устройств параллельного ввода-вывода, таймеры, контроллер прерываний, контроллер последовательного обмена [9.3]. Однокристалльный микроконтроллер является законченной МПС и позволяет существенно снизить аппаратные затраты при проектировании встроенных специализированных микропроцессорных контроллеров.

9.3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Цель настоящего раздела — описать функциональное назначение МПС в системе автоматизации. Не претендуя на полноту, определим основные функции, которые возлагаются на управляющую МПС.

Опрос датчиков параметров системы, преобразование результатов измерений к форме, удобной для последующей обработки. Простейший пример — опрос состояния контактного датчика, например конечного выключателя. Выходным сигналом датчика должен быть уровень логического нуля или логической единицы. Выход датчика подключается к одной из восьми линий порта ввода. Если имеется несколько датчиков, то они могут быть подключены к другим линиям того же порта либо к линиям нескольких портов ввода. Опрос состояния датчиков может осуществляться либо периодически, либо в процессе выполнения текущей программы по команде ввода, либо по запросу прерывания. Состояние контакторов в виде байта данных записывается в один из регистров МП, откуда может быть переписано в ОЗУ либо после преобразования выведено в устройство вывода, например, для отображения на индикаторе.

Другим распространенным примером является ввод информации с датчика аналогового сигнала. Если в системе таких датчиков несколько, то МП должен настроить аналоговый коммутатор на подключение требуемого датчика к устройству выборки и хранения. Это устройство позволяет

зафиксировать уровень аналогового сигнала в определенный момент времени и сохранить этот уровень в течение времени преобразования АЦП. Модуль АЦП производит преобразование аналогового сигнала в цифровой код, который поступает на входы порта ввода, откуда код считывается под управлением МП. Часто для определения динамики изменения сигналов возникает необходимость фиксации последовательности отсчетов, полученных с АЦП. Если управляемая система сравнительно инерционна, то требуемая скорость обмена невысока. В этом случае используют программно-управляемый обмен внешнего устройства с памятью. В высокочастотных системах возникает необходимость быстрой пересылки массива данных от АЦП в ОЗУ МПС. Для этого используют режим прямого доступа к памяти. Полученный в ОЗУ массив данных анализируется МПС в другом масштабе времени. Примером может служить анализ гармонического состава напряжения и тока, когда в течение периода делается запись определенного количества отсчетов, которые затем сравнительно медленно обрабатываются МПС с целью определения относительного содержания гармоник.

Другим примером является часто возникающая на практике необходимость записи состояния системы до возникновения аварии. Поскольку авария — событие случайное, момент наступления которого неизвестен, то МПС производит непрерывную запись процесса в ограниченную область памяти с циклической заменой информации на текущую. При наступлении аварии запись прекращается, поэтому ОЗУ хранит информацию о динамике предаварийного процесса.

В устройствах с полупроводниковыми преобразователями энергии часто возникает необходимость в быстром измерении амплитуды и фазы основной гармоники, среднего, действующего значений напряжения, фазовых сдвигов при наличии искажений тока и напряжения. Цифровые способы измерения основаны на обработке множества отсчетов, полученных на интервале измерения. Так, среднее значение напряжения описывается выражением

$$U_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i,$$

где N — число отсчетов.

Алгоритм измерения включает выделение интервала измерения, получение с помощью АЦП массива N отсчетов и накопление их суммы, деление суммы на число отсчетов. Более сложные вычисления требуется производить при измерении действующего значения основной гармоники: возведение в квадрат, умножение на функции синуса и косинуса, извлечение корня и т. д. В целях повышения быстродействия эти операции обычно выполняются с помощью таблиц, записанных в ПЗУ. Так, алгоритм измерения действующего значения содержит следующие шаги: ввод массива отсчетов, возведение их в квадрат с использованием записанных в ПЗУ таблиц, суммирование квадратов чисел, деление суммы на число отсчетов,

извлечение корня с использованием таблиц, вывод результата.

Обработка информации микропроцессорной системой. МПС обладает следующими информационными ресурсами: результатами опроса датчиков, информацией, вводимой с пульта оператора, предварительно записанной программой обработки. Задачи обработки этой информации можно разделить на четыре типа: логические, модуляционные, упорядочение массивов, вычислительные. Редко на практике реализуется какой-либо один тип задач, однако преобладание одного из них определяет специфику алгоритма.

Логические задачи возлагаются на МПС в случаях замены релейно-контактной схемы или аппаратного логического блока на интегральные микросхемы малой и средней степени интеграции. Наиболее просты комбинационные логические зависимости. Если МПС должна вычислять выражение типа $f = x(yz + \bar{y}\bar{z})$, где x, y и z — сигналы логических датчиков, то решение в наиболее примитивной форме включает выполнение операций логического умножения yz и $\bar{y}\bar{z}$, сложения этих произведений, умножения на x . Разработаны более компактные методы, которые позволяют сократить время вычисления и затраты памяти. Более сложный тип логических задач — программная реализация конечных автоматов, заданных одним из стандартных способов описания: таблицами переходов и выходов, направленными графами переходов, граф-схемами алгоритмов. В каждом из случаев решение легко алгоритмизируется: определяется состояние автомата, входные сигналы, вычисляется переход в новое состояние и соответствующий ему выходной сигнал.

Модуляционные задачи характерны, например, для систем управления преобразователями электрической энергии. Они предполагают измерение временных параметров (период, частота, коэффициент заполнения, фазовый угол) в целях регулирования выходного напряжения преобразователя. Широтно-импульсное регулирование осуществляется путем формирования интервалов, протяженность которых пропорциональна управляющему воздействию (коду). Программный способ состоит в повторении микропроцессором заданного количества операций известной длительности. Однако этот способ занимает все время МП, поэтому чаще используют аппаратно-программный способ модуляции с использованием программируемых таймеров. Загрузка счетчика таймера некоторым кодом и последующее декрементирование до получения нулевого результата позволяют преобразовать код во временной интервал. Существуют алгоритмы преобразования кода в частоту, а также обратные преобразования: интервала и частоты в код.

Упорядочение массивов — часто используемая процедура в системах научных исследований. По результатам большого количества экспериментов, в ходе которых формируются массивы параметров, можно определить количество экспериментов, результаты которых принадлежат выбранному интервалу, построить гистограмму, определить

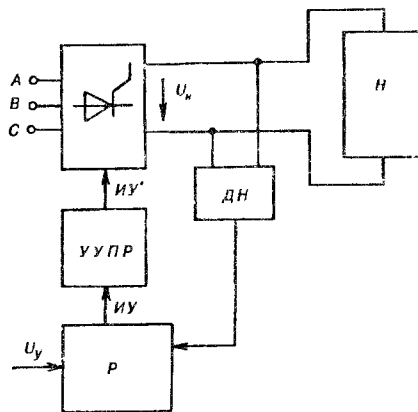


Рис. 9.2. Структурная схема цифрового регулятора

наибольшее и наименьшее значения параметра. МПС при решении подобных задач выполняет, как правило, элементарные операции: сравнение и сортировку данных. Однако эффективность автоматизации при обработке больших массивов высока благодаря большому количеству этих операций в единицу времени.

Вычислительные операции, выполняемые при автоматическом управлении, разнообразны. Одна из наиболее распространенных — цифровое регулирование. Регулятор служит для управления выходными параметрами объекта, т.е. для изменения параметра по требуемому закону либо для его стабилизации [9.4, 9.12]. Алгоритм работы цифрового регулятора рассмотрим на примере стабилизатора выходного напряжения управляемого выпрямителя (рис. 9.2). Выходное напряжение U_n с нагрузочного устройства H через датчик напряжения $ДН$, который служит для потенциальной развязки, масштабирования и фильтрации, поступает на один вход регулятора P ; на другой вход регулятора извне подается сигнал уставки U_y . Импульсы управления $ИУ$, задержанные на угол α по отношению к моменту естественного включения тиристора, через узел усиления и потенциальной развязки $УУПР$ ($ИУ'$) поступают на управляющие электроды тиристора.

Наиболее прост алгоритм пропорционального регулирования (Π -регулятор). Преобразованные в коды напряжения U_y и U_n вводятся в МПС, вычисляется рассогласование $\Delta U = U_y - U_n$, затем оно преобразуется в угол управления

$$\alpha_{i+1} = \alpha_0 - K_n \Delta U_i,$$

где α_0 — константа, начальное значение угла управления; K_n — коэффициент передачи пропорционального звена регулятора.

Если U_n уменьшилось, например, вследствие уменьшения напряжения сети, ΔU возрастает, его величина, измеренная на i -м такте, преобразуется на $i+1$ -м такте в компенсирующее уменьшение угла управления. Возможны различные режимы работы Π -регулятора (рис. 9.3). При малых K_n на каждом цикле регулирования T_n компенсируется

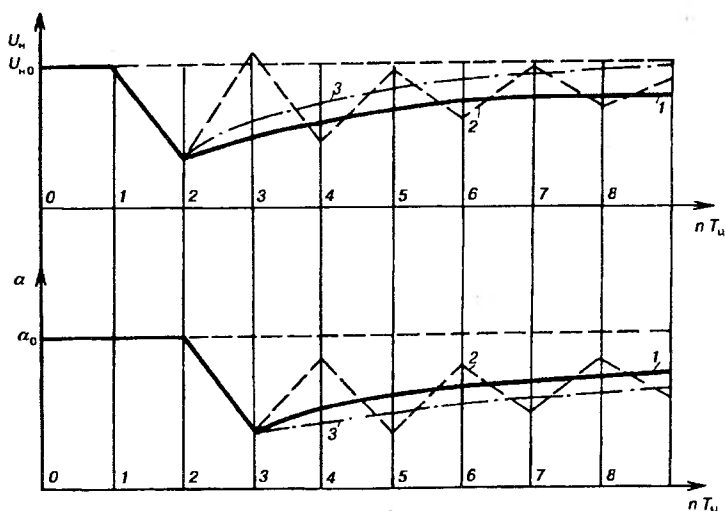


Рис. 9.3. Временные диаграммы работы цифровых регуляторов

некоторая часть возникшего рассогласования, по истечении нескольких циклов процесс устанавливается (кривая 1). Однако полная компенсация невозможна, поскольку при этом U_n не будет отличаться от исходной величины, следовательно, отпадет причина для изменения угла α . Константа α_0 выбирается так, чтобы большую часть времени регулятор работал в диапазоне углов, близких к α_0 , тогда установившаяся погрешность в этом режиме близка к нулю. Увеличение K_p может привести к колебательному режиму (кривая 2), а при достижении критического значения система становится неустойчивой. Повышение качества регулирования достигается в пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторах (кривая 3). Выходная величина регулятора — угол управления — формируется в соответствии с уравнением

$$\alpha_{i+1} = \alpha_0 - (K_p \Delta U_i + K_n \sum_{j=0}^i \Delta U_j),$$

где K_n — коэффициент передачи интегрального звена.

В дополнение к пропорциональной составляющей вводится интегральная, которая формируется как сумма рассогласований на всех предшествующих j циклах регулирования. Накопление ошибки приводит к тому, что установившаяся погрешность обращается в 0. Наиболее полно учитывается отклонение регулируемой величины в пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) регуляторе. Дифференциальная компонента позволяет избежать большого отклонения, если регулируемая величина близка к значению уставки, однако изменяется от цикла к циклу с большой скоростью. В этом случае введение поправки в угол управления, пропорциональной скорости изменения, улучшает динамические характеристики системы. Численное дифференцирование осуществляется путем определения разностей U_n на двух последних циклах регулирования

$$\alpha_{i+1} = \alpha_0 - [K_p \Delta U_i + K_n \sum_{j=0}^i \Delta U_j + K_d (U_i - U_{i-1})],$$

где K_d — коэффициент передачи дифференциального звена.

Результат обработки линейной комбинации последовательности отсчетов регулируемой величины характерен для обширного класса устройств, получивших название цифровых регуляторов. Подобные алгоритмы используются при создании интерполяторов, экстраполяторов, анализаторов гармонического состава и пр. [9.12].

Вывод управляющих воздействий. Выходные сигналы МПС, выдаваемые на магистраль данных, всегда являются цифровыми сигналами с фиксированной разрядностью. При необходимости увеличения разрядности в целях повышения точности необходим интерфейс, который позволил бы последовательно принимать два или более слова данных для их использования во внешних устройствах. Такие возможности предоставляет интерфейсный периферийный параллельный адаптер (ППА), записывающий во внутренние регистры слова данных от МП и выдающий их на внешние линии. Роль ППА состоит в фиксации сигналов в течение времени, необходимого для использования ПУ. Устройство вывода в этом случае помимо ППА должно содержать устройства потенциальной развязки и усилители мощности. Наиболее удобны оптронные пары, которые устраняют воздействие помех и наводок на МПС.

Если выходной сигнал должен быть аналоговым, вывод осуществляется с использованием ЦАП. Преобразованное слово данных записывается в регистр ППА, далее непосредственно или через узлы потенциальной развязки поступает на входы ЦАП.

Высокое быстродействие МП позволяет обслуживать несколько выходных устройств путем поочередного вывода в различные выходные порты — регистры ППА — управляющих сигналов, полученных на очередном цикле обработки информации.

9.4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Несмотря на многообразие различных МПС, связи между отдельными модулями системы в значительной степени унифицированы, поэтому затраты на разработку аппаратной части МПС составляют 20—30% от общей стоимости МПС, а основные затраты приходятся на разработку управляющих программ.

Под программным обеспечением (ПО) МПС понимают множество программ, которые используются для осуществления процесса управления объектом, а также набор программ, которые используются для разработки МПС. По типу выполняемых функций ПО МПС делят на три вида [9.13]:

прикладное ПО: множество программ, которые позволяют данной МПС решать возложенные на нее прикладные задачи (например, задачи управления);

программное обеспечение разработки программ: множество программ, используемых в качестве вспомогательных средств автоматизации на всех этапах разработки прикладного ПО от написания исходного текста программ управления до проверки правильности функционирования в реальном масштабе времени;

программное обеспечение вычислительного процесса: множество программ, предназначенных для организации вычислительного процесса как на этапе разработки, так и на этапе отладки прикладного ПО. В программное обеспечение вычислительного процесса входят операционная система общего назначения, программы самоконтроля и диагностики, программы общения с оператором, программы начального пуска и т.д.

Различают два типа ПО разработки программ: кроссовое и резидентное. Программное обеспечение разработки программ, реализованное на вычислительных средствах, программно-несовместимых с МПС, для которой программы разрабатываются, называется кроссовым ПО. А программное обеспечение, реализованное на программно-совместимых с проектируемой МПС средствах, носит название резидентного. Например, ПО разработки прикладных программ для однокристального микроконтроллера серии 1816BE51, реализованное на персональном компьютере типа IBM, является кроссовым, а сервисное ПО для МП серии K580 и K1810, реализованное на микроЭВМ CM1810, — резидентным, так как эта ЭВМ имеет в своем составе два процессора, выполненных на основе указанных серий.

Качество прикладного ПО может быть оценено несколькими критериями [9.5]:

время выполнения прикладной программы, что особенно важно для быстродействующих устройств управления;

объем памяти, занимаемый прикладным ПО, который имеет решающее значение для устройств управления на основе однокристальных микроконтроллеров;

хорошее структурирование и документирование программ, которое позволяет быстро вносить изменения в программу и ускоряет процесс отладки.

Качество ПО и трудоемкость его разработки в значительной степени определяются языками программирования, которые принято делить на четыре класса: машинные языки (коды), языки микропрограммирования, языки Ассемблера и языки высокого уровня [9.5, 9.13]. Языки микропрограммирования предназначены для специализированных МПС, выполненных на основе модульных МП (серии 1802 и 1804), которые используются в специальных средствах вычислительной техники и не предназначены для широкого класса прикладных задач.

Единственный язык, воспринимаемый аппаратными средствами МПС — это двоичные коды команд. Программирование в машинном коде — это написание реальных кодов команд, составляющих программу. Для исключения большого числа ошибок программирование ведут не в двоичном коде, а в шестнадцатеричном или восьмеричном кодах. Эти коды вводятся с помощью клавиатуры в устройство подготовки данных с последующей автоматической загрузкой в программируемое ПЗУ (ППЗУ) или ОЗУ МПС. На этапе ввода шестнадцатеричные и восьмеричные коды автоматически перекодируются в соответствующие им двоичные, которые и воспринимаются системой. При программировании в машинных кодах приходится постоянно контролировать правильность записи кодов и размещения их в памяти. Это приводит к большой трудоемкости программирования и большой вероятности ошибок. Кроме того, написанные в машинном коде программы неудобны для восприятия и вследствие этого трудно корректируются. Программирование в машинных кодах используется только в двух случаях: на этапе отладки для внесения незначительных изменений в программу и при настройке на режим периферийных БИС, таких как порты ввода-вывода, таймеры и т.д.

Основным языком для программирования МПС в настоящее время является язык Ассемблера [9.14]. В языке Ассемблера вместо кодов команд используются символические буквенные обозначения этих же команд, составленные из аббревиатур английских слов. Это значительно облегчает процесс написания и чтения программ. Кроме того, язык Ассемблера предполагает использование символических имен данных и адресов, что позволяет не связывать на этапе программирования отдельные программные модули с размещением в памяти по абсолютным адресам. Трудоемкость написания программ на языке Ассемблера значительно меньше, чем на языке машинных кодов, однако эти программы непригодны для непосредственного ввода в МПС. Они требуют применения специальных программ — трансляторов, которые заменяют символичные обозначения команд на коды этих же команд. Такие программы носят название Ассемблера. Программирование на языке Ассемблера или Макроассемблера (Макроассемблер — язык Ассемблер с дополнительными сервисными функциями)

позволяет значительно повысить производительность труда программиста по сравнению с программированием в машинных кодах, в то же время сохраняя преимущества языка машинных кодов по качеству создаваемого ПО: малое время выполнения программ и близкое к оптимальному использование памяти МПС. Однако версии языка Ассемблер ориентированы на конкретный тип МП, он далек от языков, которыми описывают алгоритмы функционирования управляемых систем. В результате для сложных алгоритмов программы на языке Ассемблера могут содержать до нескольких тысяч операторов. Такие программы требуют большого времени разработки, содержат большое количество ошибок в исходном тексте, вследствие чего процесс их отладки затруднен даже при незначительных изменениях в алгоритме. В результате процесс написания и отладки программ, объем которых превышает восемь Кбайт, на языке Ассемблера становится неоправданным.

Сокращение трудоемкости программирования и отладки сложных алгоритмов может быть достигнуто путем программирования на языках высокого уровня. Функцию перевода программы с языка высокого уровня в машинные коды МП конкретного типа выполняет специальная программа — компилятор. Переход к языкам высокого уровня лишает программиста доступа ко всем аппаратным средствам МП, что ухудшает качество программы. Современные компиляторы обладают свойствами оптимизации программ, однако они не достигают уровня высококвалифицированных программистов. Качество полученной после компиляции программы в основном определяется свойствами компилятора, а также зависит от входного языка высокого уровня [9.14]. Разработаны и нашли широкое применение языки высокого уровня, специально ориентированные на аппаратные особенности МПС: Паскаль МП+, ПЛ/М, ПЛ/М-86, БЭЙСИК-80 [9.5, 9.14].

9.5. СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для проектирования программ управления МПС требуется целый комплекс специальных программ, который носит название «Средства разработки программного обеспечения». Существующие средства разработки ПО, как правило, ориентированы на конкретную серию МП и на определенный класс средств вычислительной техники. В настоящее время для разработки прикладного ПО широко используются персональные ЭВМ (ПЭВМ) фирмы IBM и совместимые с ними. Существует большое число пакетов программ для разработки ПО МПС, которые используют в качестве входного как языки Ассемблера, так и языки высокого уровня. Реализованное на ПЭВМ ПО для большинства типов МП является кроссовым, исключение составляют МП серий 1810BM86 и 1810BM88, для которых такое ПО является резидентным. Из отечественных средств для отладки могут быть использованы ПЭВМ ЕС1840, ЕС1841,

СМ1800, СМ1810, последняя позволяет реализовать резидентные средства для МП серий К580, 1821BM85, 1810BM86. Средства разработки ПО включают четыре основных типа программ: трансляторы, загрузчики, отладчики, сервисные программы [9.5, 9.13, 9.15].

Трансляторы преобразуют программу, написанную на входном языке Ассемблера или Макроассемблера, в объектную программу на языке команд МП. Если исходный текст программы написан на языке высокого уровня, то для этих же целей используется программа компилятор. Хороший транслятор должен обладать возможностью формирования перемещаемой объектной программы, а также средствами формирования связей между отдельными программными модулями.

Загрузчики преобразуют объектные программы к виду, непосредственно готовому для исполнения на МПС (конечный вариант программы записан в машинном коде), и заносят их в память МПС. В составе загрузчиков различают размещающие программы, редакторы связей, объединители и абсолютные загрузчики. Размещающая программа из объектной программы формирует абсолютный загрузочный модуль (коды команд записаны по абсолютным адресам). Редактор связей устанавливает взаимосвязь между отдельными ссылками отдельных программных модулей. Объединитель позволяет собрать несколько программных модулей в один. Абсолютный загрузчик производит запись программы в машинных кодах в ОЗУ (или ПЗУ) МПС.

Отладчики позволяют организовать выполнение отдельного программного модуля с целью проверки правильности функционирования. Минимально необходимый набор функций отладчика включает:

- вывод на дисплей (или принтер) содержимого заданной области памяти;
- вывод на дисплей содержимого внутренних регистров МП;

- изменение под управлением оператора содержимого памяти и регистров МП;

- запуск программы на выполнение, начиная с указанного адреса;

- запуск программы с последующей остановкой в указанной контрольной точке;

- запуск программы с остановкой после выполнения каждой команды (трассировка).

Сервисные функции отладчика могут быть значительно шире и определяются конкретной программой. Если контроль работоспособности МПС производится в среде резидентного ПО, то программа отладчика является достаточной. Для организации отладки в среде кроссового ПО необходима специальная программа имитации МП того типа, для которого разрабатывают программу (программно-логическая модель), и программа управления отладкой на этой модели, которая позволяет выполнять те же действия над имитируемым МП, что и резидентные отладчики над реальным МП микроЭВМ.

Сервисные программы облегчают подготовку исходного текста, создание документации, органи-

зацию хранения и использования отлаженных программ. К сервисным программам относятся редакторы, библиотекари, программы преобразования форматов. Для ввода и коррекции исходного текста прикладных программ используются редакторы текста, которые входят в состав ПО ПЭВМ. Для хранения и использования отлаженных прикладных программ используются библиотекари исходных и объектных программ. Программы, обеспечивающие организацию библиотек и работу с ними, носят название библиотечарей. При составлении прикладного ПО загрузчик-объединитель извлекает из библиотеки необходимые программные модули и включает их в результирующую программу.

9.6. ОТЛАДКА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Создание аппаратуры и программ управления МПС после определения полной функциональной схемы устройства может осуществляться одновременно и независимо. Завершающим этапом создания управляющей МПС является совместная отладка разработанных аппаратных средств и программ, реализующих заданный алгоритм управления. Отладка представляет единый и неразрывный комплекс работ, причем нельзя говорить о работоспособности аппаратуры без испытания рабочих программ и о готовности прикладного ПО без испытания аппаратуры. Полный цикл отладки МПС можно разделить на три этапа [9.13, 9.15].

Отладка аппаратной части МПС. На этом этапе проверяется правильность электрических соединений между модулями на плате, правильность адресации всех устройств в системе, отсутствие конфликтов на магистралях, правильность выполнения всех временных соотношений сигналов в циклах обмена между отдельными кристаллами. В результате выполнения отладочных работ этого этапа в распоряжении разработчика имеется МПС, аппаратные средства которой способны выполнять загруженную в ее ОЗУ или ПЗУ программу.

Отладка программного обеспечения. На этом этапе при помощи программы отладчика проверяется правильность исполнения всех логических и вычислительных операций. Прикладное ПО после отладки не может считаться полностью работоспособным, так как отладка в режиме резидентного отладчика, а тем более на логической модели МП, не гарантирует работоспособности МП в режиме реального времени. Кроме того, обычно входы и выходы управляющей МПС представляют собой аналоговые электрические сигналы, поэтому полная работоспособность ПО может быть подтверждена только проверкой этих сигналов в режиме реального времени.

Совместная отладка программных и аппаратных средств. На этом этапе загрузочный модуль прикладного ПО проверяется на реальных аппаратных средствах в режиме реального времени.

Проведение отладочных работ требует разнооб-

разной специализированной аппаратуры, стоимость которой может во много раз превышать стоимость разрабатываемой системы. Поэтому уже на начальном этапе процесса разработки следует выбрать стратегию проведения отладочных работ и необходимые для этого технические средства. Эта стратегия определяется многими факторами:

масштабом проводимых работ, количеством разработок различного типа;

сложностью предполагаемых разработок, степенью новизны их аппаратной части и программного обеспечения;

возможностью использования определенных технических средств.

Среди используемых в настоящее время направлений проектирования и отладки МПС следует выделить [9.5]:

1. Специализированные системы проектирования МПС (СПМ), которые включают микроЭВМ и дополнительный программно-аппаратный комплекс оборудования: внутрисхемный эмулятор, специализированные логические анализаторы и пробники, устройство для программирования и стирания информации в ПЗУ (программатор), имитатор ПЗУ. Такой комплекс снабжен пакетом программ средств разработки ПО, а также программным обеспечением для работы со всеми специализированными устройствами. СПМ позволяет проводить все три этапа наладки МПС, она предоставляет разработчику наиболее широкие возможности отладки. Однако СПМ крайне дороги, и на них следует ориентироваться только в том случае, если предстоит разработка ряда сложных устройств с большим объемом программного обеспечения. Если сложность МПС невысока, а объем ее программного обеспечения не превышает 8—12 Кбайт, целесообразно пойти по одному из путей, изложенных в п. 2 и 3.

2. Использование одного из выпускаемых промышленностью одноплатных контроллеров, необходимые специализированные интерфейсы к которому будут разработаны на этапе проектирования. Желательно, чтобы контроллер обладал интерфейсом последовательного ввода-вывода для связи с ПЭВМ и специальной программой-монитором, которая позволяет осуществлять все режимы отладчика непосредственно на контроллере под управлением ПЭВМ. В этом случае для осуществления полного цикла отладки и разработки необходимо иметь ПЭВМ с пакетом ПО средств разработки и программатор ПЗУ. Первый этап аппаратной отладки в этом случае отпадает, поскольку используется уже готовый контроллер. ПЭВМ используется для отладки ПО на втором этапе, а на третьем этапе совместной отладки ПО и аппаратуры в реальном масштабе времени загрузочный модуль прикладной программы по последовательному каналу загружается в ОЗУ контроллера и выполняется им под управлением программы монитора. Контроль работоспособности ведется по реальным сигналам на выходах специализированных интерфейсов. После окончательной отладки системы производится запись программы в ПЗУ с

использованием программатора под управлением ПЭВМ. Описанный подход позволяет сократить время на первоначальных этапах отладки за счет максимального использования уже готовых аппаратных и программных средств. Кроме того, этот подход выгодно отличается меньшими начальными затратами на отладочные средства, так как МП контроллер в дальнейшем будет использован в готовой системе, а для отладки может быть использована ПЭВМ общего назначения.

3. Если промышленно-выпускаемый одноплатный контроллер по каким-либо причинам не удовлетворяет разработчика, то для совместной отладки программных и аппаратных средств может быть использован специальный пульт отладки и эмулятор ПЗУ. При таком подходе первый и второй этапы отладки выполняются независимо друг от друга. Прикладное ПО может быть отлажено с помощью кросс-средств, реализованных на ПЭВМ. Готовый загрузочный модуль под управлением ПЭВМ загружается в эмулятор ПЗУ. В качестве эмулятора может быть использован модуль ППЗУ с ультрафиолетовым стиранием или модуль ОЗУ, снабженный автономным источником питания, который позволяет сохранить информацию при переносе. После записи программы эмулятор ПЗУ механически переносится на плату контроллера. Выполнение записанной в эмуляторе ПЗУ программы ведется под управлением специального пульта отладки, функции которого аналогичны функциям отладчика.

9.7. СТАНДАРТНЫЕ СРЕДСТВА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

В настоящее время сложилась следующая классификация микропроцессорных средств, используемых в промышленности [9.16]:

унифицированные блочные микропроцессорные комплексы;

программируемые логические контроллеры;

специализированные мини- и микроЭВМ;

специализированные микропроцессорные контроллеры;

универсальные мини- и микроЭВМ, управляющие ЭВМ.

Унифицированные блочные микропроцессорные комплексы и программируемые логические контроллеры предназначены для создания средств автоматического управления в различных областях промышленности. Аппаратные средства этих устройств обладают повышенной надежностью, особенно в тяжелых условиях эксплуатации: запыленность, вибрации, электромагнитные помехи, активные химические среды. Отсутствие ориентации на конкретный тип объекта управления определяет основной принцип их построения: модульность конструкции, которая позволяет разработчику создать необходимую конфигурацию системы из стандартных модулей в стандартном конструктиве. Эти два класса устройств ориентированы на производство большими сериями, что

определяет их относительно низкую стоимость по сравнению со специализированными средствами.

Унифицированные блочные микропроцессорные комплексы представлены серийным оборудованием КТС-ЛИУС-2, МСУВТ В7/В9 и др.

Комплекс технических средств логических информационно-управляющих систем КТС-ЛИУС-2 предназначен для построения локальных автоматизированных систем управления отдельными установками, агрегатами, группами агрегатов и технологическими процессами с малым и средним количеством контролируемых параметров, относительно обособленных или входящих в состав нижнего яруса АСУТП и интегрированных АСУ с иерархической структурой. Комплекс КТС-ЛИУС-2 применяется также в качестве активного устройства связи управляющих вычислительных комплексов с объектом и оперативным персоналом в составе промышленных АСУТП [9.17]. Построение аппаратных средств КТС-ЛИУС-2 основано на принципах типизации структур, унификации интерфейсов связи, конструктивной унификации, которые позволяют автоматизировать процесс компоновки устройств на основе модулей КТС-ЛИУС-2 применительно к конкретным задачам и характеристикам создаваемых систем, в том числе быстродействующих автоматизированных электроприводов. Проектная компоновка предусматривает создание объектно ориентированных комплексов без проведения опытно-конструкторских работ и не требует технической подготовки производства при заводском изготовлении таких изделий.

В номенклатуре модулей КТС-ЛИУС-2 можно выделить следующие категории изделий:

одноплатные микропроцессорные контроллеры, выполненные на основе МП серий К580, К1821, К18910;

модули памяти ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ — расширители блоков памяти для одноплатных контроллеров;

средства обмена информацией, сопряжения с другими агрегатными комплексами и ЭВМ;

модули ввода-вывода;

модули для подключения к внутривидеоматрице периферийных приборов и устройств с неунифицированными связями;

концентраторы — выносные элементы коммутации и распределения сигналов;

средства ручного ввода-вывода и отображения информации;

оперативно-диспетчерское оборудование;

модули нормализации, преобразования и усиления сигналов;

источники питания собственных нужд.

Блоки конструктивно выполняются во вставных каркасах и устанавливаются в поворотных рамах шкафов (800 × 1800 × 650 мм), в столах и тумбах (800 × 760 × 800 мм).

Программное обеспечение КТС-ЛИУС-2 состоит из ПО разработки программ, реализованного на СМ ЭВМ и ЕС ЭВМ, и ПО функционирования объектно-ориентированных комплексов. Программное обеспечение разработки программ включает Ассемблер для абсолютных программ, редактор,

отладчик, Макроассемблер перемещаемых программ, редактор связей. В библиотеке макрокоманд содержатся макроопределения процедур, наиболее часто встречающиеся при решении задач АСУТП, и арифметические операции в двухбайтовом формате. Программное обеспечение функционирования комплекса представляет операционную систему, состоящую из постоянной (ядро) и переменной (проектно-компонованная) частей. В составе ядра операционной системы находятся следующие программы: диспетчер, монитор ввода-вывода, регулировщик задач. В состав переменной части входят библиотеки модулей подпрограмм ввода-вывода и подпрограмм обработки. Переменная часть комплектуется исходя из конкретной конфигурации и функциональных задач комплекса.

Архитектура комплекса МСУВТ В7/В9 ориентирована на создание мультипроцессорных управляющих систем [9.18; 9.19]. Отличительной особенностью комплекса является наличие в аппаратных средствах трех типов магистралей: внутримашинной, межмашинной и дистанционной. К внутримашинной магистрали подключаются модули микропроцессорных контроллеров, модули цифрового и аналогового ввода-вывода, модули сопряжения с телевизионным устройством отображения информации и накопителем на гибких дисках. Межмашинная магистраль предназначена для объединения 24 устройств типа В7/В9 в единую управляющую систему. Дистанционная магистраль (последовательная, дублированная) позволяет связывать в систему до 62 устройств, удаленных на значительные расстояния.

Программируемые логические контроллеры (ПК) предназначены для локальной автоматизации наиболее часто встречающихся в промышленности технологических задач, которые описываются преимущественно комбинационными и логическими функциями [9.6]. ПК с успехом заменяют блоки

релейной автоматики и устройства жесткой логики на интегральных микросхемах малой и средней степени интеграции. Конструкция и технология изготовления ПК максимально соответствуют условиям использования в промышленной среде. Структура и схемотехника входов и выходов удовлетворяют большинство потребителей, в частности обеспечивают возможность измерения и управления на расстоянии. Отсутствие больших массивов памяти при выполнении обычных задач повышает надежность системы. Программируемый логический контроллер представляет собой законченную оригинальную форму МП средств, которые характеризуются оригинальной архитектурой и специальным программным обеспечением, благодаря чему ПК легко осваиваются персоналом, не имеющим специальной подготовки в области программирования.

Структура ПК, подключенного к объекту, представлена на рис. 9.4. Центральный процессор включает собственно МП, память ППЗУ программ и ОЗУ данных, а также дополнительные модули счетчиков и таймеров для реализации временных задержек. Отдельные ПК имеют в своем составе до 100 таймеров. Интерфейс между объектом управления и внутренней логикой ПК обеспечивается специальными электронными модулями, называемыми адаптерами. Адаптеры входов и выходов подключаются к магистрали центрального процессора. В связи с тем, что ПК ориентированы на создание логических автоматических систем, особое внимание уделяется конструкции помехоустойчивых дискретных входов-выходов с гальванической развязкой. Типовая структура двоичного входа ПК представлена на рис. 9.5. Кроме собственно приема информации двоичные входы производят предварительную обработку сигнала, выделение помех, развязку сигналов с различными уровнями мощности. Наиболее часто уровень по-

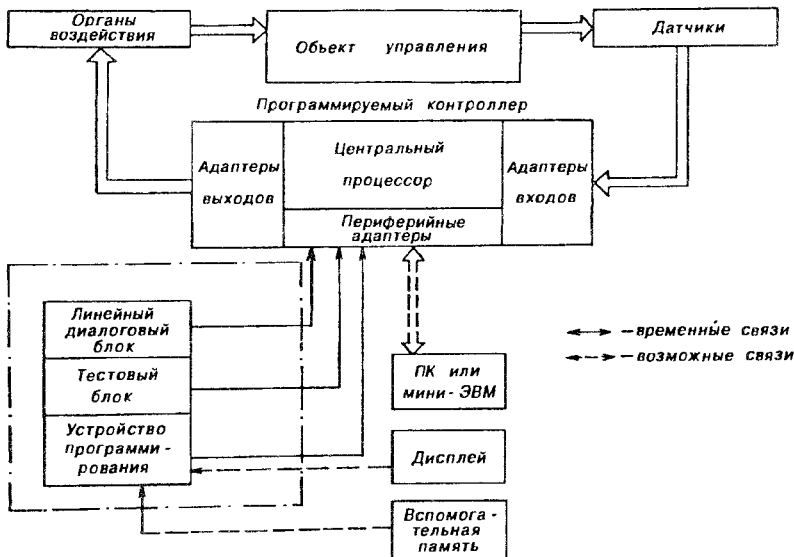


Рис. 9.4. Структура программируемого контроллера

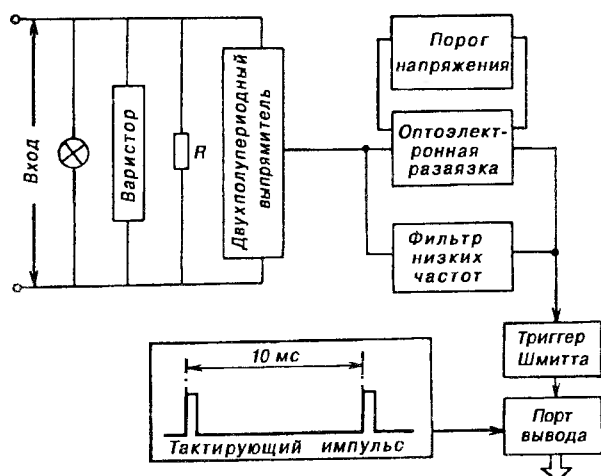


Рис. 9.5. Структурная схема двоичного входа программируемого контроллера

стоянного или переменного напряжения входного сигнала равен 12, 24, 110, 220 В, значительно реже 5 и 15 В. Отдельные логические входы могут быть выполнены с регулируемым порогом. Адаптеры двоичных выходов кроме гальванической развязки должны обеспечивать определенную мощность сигнала, необходимую для управления объектом. Типовая структура двоичного выхода ПК представлена на рис. 9.6. Чаще всего встречаются следующие параметры выходов: постоянное напряжение 12 и 24 В или переменное напряжение 24, 110, 220 В при токе от нескольких миллиампер до нескольких ампер. Нагрузочным устройством выхода является реле или симистор при переменном токе и транзистор при постоянном токе. При переменном токе развязка обеспечивается разделительным трансформатором, а при постоянном токе — оптроном. Аналоговые и цифровые (работающие с информацией в виде слов) входы-выходы имеют ПК, производящие цифровую обработку информации.

Множество ПК принято разделять на гаммы. Различают два понятия гаммы: количественная и функциональная (качественная). Для классификации оборудования в рамках количественной гаммы используют в качестве критерия максимальное число входов и выходов ПК N . ПК относят к нижней части гаммы, если $20 < N < 100$, к средней части гаммы, если $100 < N < 500$, к верхней части гаммы, если $N > 500$ ($N = 20$ — нижний предел рентабельности ПК). В рамках качествен-

ной гаммы критерием является наличие команд цифровой обработки данных (арифметические операции над данными). ПК относят к нижней части качественной гаммы, если обработка цифровых данных не производится; к средней части гаммы, если производится упрощенная обработка цифровых данных; к верхней части гаммы, если производится совершенная обработка цифровых данных. В настоящее время наиболее широкое применение находят ПК средней части качественной и количественной гаммы [9.6, 9.21]. Средний ПК имеет около 20 команд, до 500 входов-выходов, память объемом от 4 до 16 К двухбайтовых слов.

Для программирования ПК используются языки Ассемблера, специального мнемокода, а также языки релейно-контактных схем (РКС) с использованием логических уравнений (булева алгебра).

В табл. 9.2 приведены сведения о выпускаемых в настоящее время ПК. Среди них следует выделить серию МикроДАТ, разработанную в Харьковском НПО САУ. Она представляет собой ряд законченных устройств со все возрастающими функциональными возможностями [9.20—9.22].

Специализированные мини- и микроЭВМ (СЭВМ), специализированные микропроцессорные контроллеры ориентированы на конкретный тип объекта управления, наиболее часто используются как встраиваемые. Вследствие этого они имеют специальную аппаратную организацию как центрального процессора, так и интерфейсных модулей. Конструктивное исполнение ориентировано на



Рис. 9.6. Структурная схема двоичного выхода программируемого контроллера

Т а б л и ц а 9.2. Программируемые контроллеры

Тип программируемого контроллера	Выполняемые функции	Количество входов/выходов (год*)	Параметры дискретных сигналов, В/А		Дополнительные типы блоков	Язык программирования	Сервисное оборудование контроллера	Габариты контроллера, мм
			Входы	Выходы				
УЛП (г. Тверь)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 1024 (1980)	= 5 В, 24 В = 110 В	= 24 В, 110 В релейный выход	Связь с импульсным датчиком ПДФЗ	Машинный код	Упрощенный пульт-программатор	265×482×207
Б9601 (г. Тверь, г. Александрия, г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные	256/256 (1985)	= 5 В, 12 В = 15 В, 24 В = 110 В = 220 В ~ 24 В ~ 110 В ~ 220 В	= 24 В ~ 24 В ~ 110 В релейный выход	—	РКС, булева алгебра	Упрощенный пульт-программатор	264×482×207
КПВ11-05 (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные, арифметические	1024/1024 (1987)	= 5 В, 12 В = 24 В, = 110 В, = 220 В ~ 24 В ~ 110 В ~ 220 В	= 24 В ~ 24 В ~ 110 В релейный выход	ЦАП, АЦП, связь с ПДФЗ, связь с принтером, ИРПС	РКС, булева алгебра, мнемокод	Переносной пульт-программатор	265×482×207
КПМ-30-01-0 (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные	64/64 (1989)	= 24 В	= 24 В	ИРПС — 2 шт.	Ассемблер	Переносной пульт-программатор	886×240×80
КПМ-30-01-1 (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные, ввод данных с клавиатуры индикации	64/64 без гальванической развязки с гальванической развязкой (1989)	= 24 В	= 24 В	ИРПС — 1 шт.	Ассемблер	Переносной пульт-программатор	—
КПМ-11-03 (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные, позиционирование	16/16 (1990)	= 24 В = 110 В	= 24 В	ЦАП, связь с импульсным датчиком, связь с ЭВМ	Ассемблер	Переносной пульт-программатор	—
КП1 (г. Москва)	Логические, временные, счетные, арифметические	1024/1024	= 12 В = 220 В ~ 12 В ~ 220 В	= 12 В = 220 В ~ 12 В ~ 220 В релейный выход	—	РКС, мнемокод	Переносной пульт-программатор	220×700×800
КПВ21-02 (г. Москва)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 256 (1988)	= 12 В = 220 В ~ 12 В ~ 220 В	= 12 В = 110 В 220 В релейный выход	—	РКС, мнемокод	Дисплейный пульт	555×580×415

Продолжение табл. 9, 2

Тип программируемого контроллера	Выполняемые функции	Количество входов/выходов (год)	Параметры дискретных сигналов, В		Дополнительные типы блоков	Язык программирования	Сервисное оборудование контроллера	Габариты контроллера, мм
			Входы	Выходы				
МикроДАТ МУ57.0 (г. Нальчик)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 1920 (1988)	12 В 24 В 110 В 220 В	24 В 110 В	ЦАП, АЦП, ИРПС, импульсных сигналов связь между ПК	РКС, булева алгебра, мнемокод	Переносные программаторы МВ 96.01 МВ 96.02 МВ 96.03 МВ 94.02	1800×800×400
МикроДАТ КМ3414 (г. Житомир)	Логические, временные, счетные	Общее число 992 (1985)	12 В 24 В 110 В 220 В 110 В 220 В	24 В 48 В 110 В 220 В	—	РКС, булева алгебра	Устройство программирования, дисплей, принтер, фотосчитыватель, перфоратор	1800×800×400
МикроДАТ МУ58.0 (г. Киев)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 248 (1988)	12 В 24 В 110 В 220 В	24 В 110 В	ЦАП, АЦП, ИРПС, блок ввода импульсных сигналов, связь между ПК	РКС, булева алгебра, мнемокод	Переносные программаторы МВ 96.01 МВ 96.02 МВ 96.03 МВ 94.02	900×800×490
МикроДАТ МУ59.0 (г. Нальчик)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 2048 (1989)	12 В 24 В 110 В 220 В	24 В 110 В	ЦАП, АЦП, ИРПС, блок ввода импульсных сигналов, связь между ПК	РКС, булева алгебра, мнемокод	Переносные программаторы МВ 96.01 МВ 96.02 МВ 96.03 МВ 94.02	1800×800×400
МикроДАТ МУ59.01 (г. Краснодар)	Логические, временные, счетные	Общее число от 12 до 116 (1988)	24 В 110 В	24 В 110 В	—	Булева алгебра	Переносной программатор МВ 96.05	290×80×167
МБ57.0 (г. Киев)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 32, 64, 128 (1986)	12 В 24 В 110 В 220 В	24 В 110 В	—	РКС, булева алгебра, мнемокод	Переносные программаторы МВ 96.01 МВ 96.02 МВ 96.03 МВ 94.02	—
МСУВТ (г. Александрия)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 240 (1989)	24 В 110 В 220 В	24 В 220 В	ЦАП, АЦП, ИРПС	Ассемблер	Пульт оператора	482×266×232
СМ9107	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 146	12 В 220 В 110 В 220 В	24 В 220 В	ИРПС	Ассемблер	Пульт оператора	540×540×540
GEM80	Логические, временные, счетные, арифметические, регулирование	Общее число от 20 до 8000 (1992)	—	—	ЦАП, АЦП, ИРПС	РКС	Дисплей, принтер, магнитофон	—

О к о н ч а н и е т а б л . 9 . 2

Тип программируемого контроллера	Выполняемые функции	Количество входов/выходов (год)	Параметры дискретных сигналов, В		Дополнительные типы блоков	Язык программирования	Сервисное оборудование контроллера	Габариты контроллера, мм
			Входы	Выходы				
МКП1 (г. Могилев)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 48 (1988)	= 24 В	= 24 В	ИРПС	—	—	480×275×170
Ломиконт (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные, арифметические	(1988)	= 24 В	= 24 В	ЦАП, АЦП, ИРПС	Микрол	—	—
Ремиконт (г. Чебоксары)	Логические, временные, счетные, арифметические, регулирование	512/256	= 24 В	= 24 В	ЦАП, АЦП, ИРПС	Язык функциональных блоков	—	—
ПК-85 (г. Чернигов)	Логические, временные, счетные, арифметические	32/32 (1992)	= 24 В 110 В	= 24 В 110 В	ЦАП — 4 канала АЦП — 16 каналов ИРПС, ИРПР, модуль фотоимпульсных датчиков	ПАТ — параллельный, Ассемблер технологий, ФОРТ-Т	Пульт ввод программ, газоразрядный дисплей. Программные средства обмена с IBM-AT, CM 1420 и между ПК	—
ФК-5001 (г. Киев)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 256 — один блок Расширение до трех блоков (1992)	= 5 В = 12 В = 24 В ~110 В ~220 В	= 24 В (0,5 А) = 32 выхода = 24 В (2,0 А) = 16 выходов ~24 В ~110 В релейные выходы	ЦАП — 4 канала АЦП — 16 каналов (12 разрядов), ИРПС, модуль связи с сельсином, модуль дистанционного расширения ввода-вывода	Мнемикод	Пульт программирования и отладки, пульт записи программ, панель оператора	485×300×200
УПУ-ТП (г. Пенза)	Логические, временные, счетные, арифметические	Общее число 64 (1990)	= 24 В ~110 В ~220 В	= 24 В ~110 В ~220 В релейные выходы	Модуль связи с принтером по Q BUS	—	Пульт программирования УП-1	482×266×280
ОПК-32...512 ПК512 (г. Киев)	Логические, временные, счетные, арифметические, преобразование систем числения	Общее число от 32 до 512 — один блок Для ПК512 расширение до трех блоков (1992)	= 24 В 110 В альтернативная развязка 1500 В	= 24 В ~110 В ~220 В	Для ПК512 — ИРПС, блок управления сервоприводом	—	Панель оператора технологическая, дисплей — 3 строки, 16 символов	482×276×245
МикроУРС (г. Харьков)	Логические, временные, счетные, арифметические, регулирование	Общее число 256 дискретных и импульсных 128 аналоговых (1992)	= 24 В (1 А) ~36 В ~48 В ~110 В ~220 В	= 24 В (1 А) ~36 В ~48 В ~110 В ~220 В	ЦАП, АЦП, ИРПС, модуль ввода сигналов от термометров, сопротивлений ТСМ, ТСП, модуль ввода частотных сигналов, сток С2	—	Пульт программирования и отладки, блок программатора, блок диагностирования	Ряд картасов: 145×285×253 215×285×253 295×285×253 375×285×253

* Начало освоения серийного выпуска.

Т а б л и ц а 9.3. Технические характеристики отечественных управляющих микроЭВМ

Марка микроЭВМ	Разрядность, бит	Объем ОЗУ, Кбайт	Быстродействие, 10^3 опер/с	Серия МП	Состав основного ПО	Состав развитого ПО
СМ-1800	8	64	100	К580	Ассемблер ПЛОС	ОСРВ БЕЙСИК
«Электроника-60»	16	64	150	К581	Ассемблер ПЛОС	ОСРВ БЕЙСИК
НЦ 80 01 НМС11100.1	16	64	200	К1801	Ассемблер ДОС	ОСРВ БЕЙСИК ПАСКАЛЬ
СМС 121.2 С5-41	16	64	200	К1801	Ассемблер	—
СМ - 1810*	8 16	64	100 для К580 200 для К1810	К580 К1810ВМ86	Ассемблер ДОС	ОСРВ БЕЙСИК, ПЛ/М ПАСКАЛЬ

* Имеет в составе два процессорных блока на различных микропроцессорах ФОРТРАН.

В таблице приняты обозначения: ДОС — дисковая операционная система; ПЛОС — перфоленточная операционная система; ОСРВ — операционная система реального времени.

минимизацию связей между отдельными модулями и, как правило, не допускает наращивания. Программное обеспечение специализированное, входной язык ориентирован на конкретную область применения и не требует специальных знаний в области программирования. Специализированные средства являются более дорогими по сравнению с универсальными. Поэтому их применяют для повышения эффективности использования технологического оборудования при выпуске установок большими партиями. Целесообразно выделить следующие области использования СЭВМ:

устройства числового программного управления металлорежущими станками (управляющие системы «Электроника-НЦ31», «Электроника МС-2101»;

СЭВМ для комплектов тиристорных электроприводов (БВУ-9200, БО1-86);

СЭВМ для АСУТП.

Мини- и микроЭВМ общего назначения, персональные ЭВМ, управляющие мини- и микроЭВМ обладают возможностью выполнения большого объема вычислительных операций, имеют развитую операционную систему, снабжены стандартными устройствами ввода-вывода (клавиатура, дисплей). Все это делает их использование целесообразным в задачах управления с применением оптимизационных расчетов в реальном времени, при решении в процессе управления задач интерполяции и аппроксимации, при использовании статистических методов контроля за ходом технологического процесса с последующей автоматической коррекцией, при необходимости хранения большого банка данных для целей управления и организации развитого диалога в автоматизированных системах. Управляющие мини- и микроЭВМ (табл. 9.3) содержат в своем составе аналогичные ЭВМ общего назначения, однако они дополнены специальными конструктивами (крейты, стойки), которые позволяют разместить устройства ввода-вывода, стандартные программируемые измерительные приборы, дополнительные микроконтроллеры для локального управления. В насто-

ящее время наиболее распространенными являются два стандарта: КАМАК (ГОСТ 27080-86 и 26.201.2-84) и интерфейс приборной магистрали ГОСТ 26.003-80 (аналог МЭК 625-2). Стандарт определяет спецификацию линий связи интерфейсных модулей с ЭВМ, алгоритмы обмена по магистралям, конструктивное исполнение электронных модулей, систему команд управления модулями. Стандарт МЭК по сравнению с КАМАК не так жестко регламентирует конструктивное исполнение, имеет меньшее количество линий связи, является более дешевым, однако обладает значительно более низкой скоростью обмена информацией. Стандарты МЭК и КАМАК имеют преимущественную ориентацию на исследовательские работы, их конструктивное исполнение не рассчитано на работу в промышленных условиях. Поэтому в промышленности персональные ЭВМ, мини- и микроЭВМ целесообразно использовать для автоматизации единичных процессов и установок при создании необходимых условий эксплуатации вычислительной техники. Некоторые управляющие ЭВМ выполнены с интерфейсами, отличными от стандартов МЭК и КАМАК. Например, управляющая микроЭВМ СМ1810 использует магистраль И-41 [9.11].

Таким образом, применение микропроцессорных средств возможно на разных уровнях, от разработки специализированных средств, оптимизированных по существенным для заказчика факторам, до приобретения стандартного оборудования и его программирования применительно к конкретным задачам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 9.1. Гилмор Ч. Введение в микропроцессорную технику: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986.
- 9.2. Микропроцессоры. В 3-х кн.: Учебн. для вузов /Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Высшая школа, 1986.
- 9.3. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на

однокристалльных микроконтроллерах. М.: Энергоатомиздат, 1990.

9.4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.

9.5. Фаулдджер Р. Программирование встроенных микропроцессоров: Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

9.6. Мишель Ж., Лоржо К., Эспьо Б. Программируемые контроллеры: Пер. с франц. М.: Машиностроение, 1986.

9.7. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем: Справочник. В 2-х т. /В. Абraitис, Н.Н. Аверьянов, А.И. Белоус и др.; Под ред. В.А. Шахнова. М.: Радио и связь, 1988.

9.8. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления: Справочник / С.Т. Хвоц, Н.Н. Варлинский, Е.А. Попов; Под общ. ред. С.Г. Хвоца. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1987.

9.9. Проектирование микропроцессорной электронно-вычислительной аппаратуры: Справочник / В.Г. Артюхов, А.А. Бурак, В.Ю. Лапий и др. Киев: Техника, 1988.

9.10. Шевкопляс Б.В. Микропроцессорные решения: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990.

9.11. Интерфейсы систем обработки данных: Справочник /А.А. Мячев, В.Н. Степанов, В.Н. Шербо; Под ред. А.А. Мячева. М.: Радио и связь, 1989.

9.12. Фридмен М., Ивенс Л. Проектирование систем с микрокомпьютерами: Пер. с англ. М.: Мир, 1986.

9.13. Микропроцессоры: системы программирования и отладки/ В.А. Мясников, М.Б. Игнатъев, А.А. Кочкин и др.; Под ред. В.А. Мясникова, М.Б. Игнатъева. М.: Энергоатомиздат, 1985.

9.14. Погорелый С.Д., Слободянюк Т.Ф. Программирование встроенных микропроцессоров: Справочник. Киев: Техника, 1985.

9.15. Уильямс Г.Б. Отладка микропроцессорных систем: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988.

9.16. Микропроцессорные средства производственных систем/ В.Н. Алексеев, А.М. Коновалов, В.Г. Колосов и др.; Под общ. ред. В.Г. Колосова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1988.

9.17. ГСП. Отраслевой каталог, т.4, вып.4. «Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем на базе микросхем с повышенной степенью интеграции и микропроцессоров (КТС-ЛИУС-2). Общая Часть». М.: ЦНИИприборостроения. 1981. №10.

9.18. Холик И.И., Плетняков В.Б., Кудряшова Н.Н. / Новые функциональные возможности ЛВС МСУВТ В7/В9 (для систем автоматизации // Электротехника. 1990. №4. С. 38—40.

9.19. Анашкин И.И., Гагарин В.А. Многофункциональный информационно-управляющий комплекс на базе одноплатных ЭВМ // Микропроцессорные средства и системы. 1989. №1. С. 79—82.

9.20. Коневцов В.А., Казаченко А.П. Баба-янц А.В. МикроДАТ. Программные средства цифрового управления. 1985, Вып. 5, 6 (ЦНИИприборостроения).

9.21. Диденко К.И., Перекрестов А.Г., Алдабаев Г.К. Программируемые контроллеры МикроДАТ // Приборы и системы управления. 1991. №1. С. 2—8.

9.22. Фурман И.А. Перспективы развития структуры и технологии применения параллельных логических контроллеров // Электротехника. 1990. №4. С. 48—52.

Р а з д е л 10

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

СО Д Е Р Ж А Н И Е

10.1. Стандартизация и унификация в электротехнической промышленности	196
Общие положения. Категории и виды стандартов (196). Унификация (196). Номинальные ряды напряжений, частот и токов (197). Защита от внешних воздействий (200). Термины и обозначения (200).	
10.2. Надежность. Показатели надежности. Основные определения (200). Показатели надежности невосстанавливаемых объектов (201). Показатели надежности восстанавливаемых объектов (202). Экспериментальная	200

оценка показателей надежности (203). Типовые аппроксимации законов распределения наработки компонентов (203).	
10.3. Расчет показателей надежности системы по показателям надежности ее элементов	203
Статические системы. Булева модель (203). Динамические системы. Марковская модель (208)	
10.4. Резервирование	211
Основные понятия и определения (211). Примеры резервированных систем (211).	
Список литературы	217

10.1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УНИФИКАЦИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. КАТЕГОРИИ И ВИДЫ СТАНДАРТОВ

Стандартизация в электротехнической промышленности строится на базе государственной системы стандартизации (ГСС).

Стандарты в нашей стране подразделяются на следующие категории:

- государственные стандарты (ГОСТ);
- отраслевые стандарты (ОСТ);
- стандарты предприятий (СТП).

Стандарты являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Государственные стандарты устанавливаются преимущественно на продукцию массового и крупносерийного производства, на изделия и продукцию, имеющие важное народнохозяйственное значение, и другие объекты. Установление стандартов необходимо для обеспечения оптимального качества продукции, единства и взаимосвязи различных областей науки, техники, производства, культуры и др.

Отраслевые стандарты устанавливают требования к продукции, не относящиеся к объектам государственной стандартизации, к технологической оснастке, инструменту, специфическим для отрасли; технологические нормы и типовые технологические процессы отраслевого применения, а также нормы, правила, требования, термины и обозначения, необходимые для обеспечения взаимосвязи в производственно-технической деятельности предприятий и организаций отрасли.

Кроме того, в отраслевых стандартах устанавливаются основные положения и требования в области организации производства и управления качеством продукции, нашедшие широкое применение в последнее время.

Стандарты предприятий (объединений) устанавливают нормы, правила, требования, методы и другие объекты стандартизации, применяемые только на данном предприятии, в данном объединении.

На поставляемую продукцию стандарты предприятий (объединений) не утверждаются, и в конструкторской документации основного производства не допускается давать ссылку на стандарты предприятий (объединений).

Построение, изложение и оформление технических условий осуществляются в соответствии с правилами, установленными ГОСТ 2.114-70.

Понятие «вид стандарта» определяет содержание стандарта в зависимости от его назначения.

Стандарты всех категорий на продукцию подразделяются на виды:

- стандарты технических условий (общих технических условий);
- стандарты общих технических требований (технических требований);
- стандарты параметров и (или) размеров;

стандарты типов, основных параметров и (или) размеров;

- стандарты конструкций и размеров;
- стандарты марок;
- стандарты сортамента;
- стандарты правил приемки;
- стандарты методов контроля (испытаний, анализа, измерений);
- стандарты правил маркировки, упаковки, транспортирования и хранения;
- стандарты правил эксплуатации и ремонта;
- стандарты типовых технологических процессов.

В стандартах любых видов, если это вызвано спецификой продукции, должны быть отражены требования безопасности труда.

В стандартах допускается предусматривать данные, свойственные стандартам нескольких видов, например стандартам правил приемки и методов контроля, стандартам технических требований, маркировки, упаковки, транспортирования и хранения.

УНИФИКАЦИЯ

При многообразной номенклатуре изделий электротехнической промышленности и большом количестве исполнений унификация является наиболее эффективным средством осуществления стандартизации, сокращения номенклатуры выпускаемых изделий, необходимой предпосылкой для организации специализированных производств.

Под унификацией понимают рациональную разработку минимального числа типовых изделий одинакового функционального назначения (а также узлов и деталей, входящих в них) с тем, чтобы из них можно было собрать различные более сложные устройства с добавлением некоторого ограниченного количества специальных (оригинальных) узлов и деталей.

Унификация устройств одинакового функционального назначения основана на применении одной базовой модели для построения ряда однотипных изделий с различными основными параметрами.

Выбор объектов унификации электротехнических изделий базируется на анализе основных параметров, которым они должны соответствовать, выявлении общих из них и на разработке единых серий электротехнического оборудования с характеристиками, удовлетворяющими требованиям как можно большего числа отраслей народного хозяйства. На базе основного исполнения единых серий разрабатываются специализированные исполнения, например, для химической промышленности, для работы в тропических условиях и т.д.

- Применение метода унификации позволяет:
 - значительно уменьшить объем конструкторских работ и сроки проектирования;
 - снизить стоимость и сократить сроки освоения производства новых изделий;
 - повысить уровень механизации и автоматизации производственных процессов, снизить трудоемкость и повысить производительность труда

путем организации специализированных производств;

Обеспечить большую гибкость и мобильность производства при переходе на выпуск новых изделий;

повысить качество выпускаемой продукции, надежность и долговечность путем тщательной обработки унифицированных изделий и технологий их изготовления;

облегчить эксплуатацию, обслуживание и ремонт;

способствовать международному разделению труда и конкурентоспособности на внешнем рынке.

Оценку уровня унификации изделий производят по количеству, массе и трудоемкости унифицированных деталей, отнесенных к общему количеству деталей, массе и трудоемкости изделия в целом.

1. Коэффициент унификации по количеству, деталей

$$K_{y.d} = \sum UD / \sum D,$$

где $\sum UD$ — количество унифицированных деталей в изделии; $\sum D$ — общее количество деталей в изделии.

2. Коэффициент унификации по массе деталей

$$K_{y.m} = \sum UM / \sum M,$$

где $\sum UM$ — масса унифицированных деталей; $\sum M$ — общая масса изделия.

3. Коэффициент унификации по трудоемкости

$$K_{y.t} = \sum UT / \sum T,$$

где $\sum UT$ — трудоемкость изготовления унифицированных деталей; $\sum T$ — общая трудоемкость изготовления изделия.

Под термином «унифицированные детали» в данном случае подразумевается сумма стандартизованных заимствованных и покупных деталей.

4. Комплексный коэффициент степени унификации

$$K = \frac{\sum UM \cdot C_{y.m} + \sum UT \cdot C_n}{\sum M \cdot C_m + \sum T \cdot C_n},$$

где $C_{y.m}$ — средняя стоимость единицы массы унифицированных деталей в изделии; C_m — средняя стоимость единицы общей массы изделия; C_n — средняя стоимость одного нормо-часа.

Таким образом, K — отношение части производственных затрат на изготовление унифицированных деталей к производственным затратам на изготовление всего изделия.

НОМИНАЛЬНЫЕ РЯДЫ НАПРЯЖЕНИЙ, ЧАСТОТ И ТОКОВ

Главными параметрами, служащими принципиальной основой проектирования и конструирования электротехнических изделий для всех видов и назначений электрических устройств, электростановок, а также применяемыми при практическом осуществлении электрификации, являются номинальные напряжения, частоты и токи, устанавливаемые государственными стандартами.

Стандартные напряжения, частоты и токи определены следующим комплексом стандартов:

ГОСТ 23366-78 «Ряды номинальных напряжений постоянного и переменного тока»;

ГОСТ 21128-83 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В и допускаемые отклонения»;

ГОСТ 721-77 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В»;

ГОСТ 6697-83 «Системы электроснабжения, источники, преобразователи и приемники электрической энергии переменного тока. Номинальные частоты от 50 до 10 000 Гц и допускаемые отклонения»;

ГОСТ 6827-76 «Электрооборудование и приемники электрической энергии. Ряд номинальных токов».

ГОСТ 23366-78 распространяется на изделия, имеющие выводы для электрического соединения (присоединения) с другими изделиями и устанавливает ряды номинальных напряжений на выводах этих изделий для постоянного и переменного тока с частотами по ГОСТ 6697-83.

Основной ряд постоянного и переменного напряжения для изделий, предназначенных для использования электроэнергии: 0,6; 1,2; 2,4; 6; 9; 12; 27; 40; 60; 110; 220; 380; 660; 1140; 3000; 6000; 10 000; 20 000; 35 000; 110 000; 220 000; 330 000; 500 000; 750 000; 1 150 000 В.

Для источников и преобразователей электроэнергии:

переменное напряжение, В: 6; 12; 28,5; 42; 62; 115; 120; 208; 230; 400; 690; 1200; 3150; 6300; 10 500; 13 800; 15 750; 18 000; 20 000; 24 000; 27 000; 38 500; 121 000; 242 000; 347 000; 525 000; 787 000;

постоянное напряжение, В: 6; 9; 12; 28,5; 48; 62; 115; 230; 460; 690; 1200; 3300; 6600.

Номинальные напряжения до 1000 В. ГОСТ 21128-83 устанавливает номинальные значения и допускаемые отклонения переменного и постоянного напряжения систем электроснабжения, сетей, источников, преобразователей и присоединяемых к ним приемников электроэнергии. Стандарт не устанавливает значения и допускаемые отклонения напряжения, соответствующие аварийным режимам работы и переходным процессам; изделия, работа которых по принципу действия не характеризуется фиксированным значением напряжения; устройств для технологических процессов, осуще-

Т а б л и ц а 10.1

Постоянный ток		Переменный ток*			
Источники и преобразователи**	Сети и приемники	Источники и преобразователи		Сети и приемники	
		Однофазный ток	Трехфазный ток	Однофазный ток	Трехфазный ток
28,5 115	27 110	42	42	40	40
230	220	230	230	220	220
460	440	—	400 690	380 660	380 660

* Значения номинального переменного напряжения установлены для частот по ГОСТ 6697-83 и являются также рекомендуемыми для нефиксированных частот более 10 000 Гц.
** Для источников и преобразователей трехфазных цепей указаны линейные значения напряжения.

ствление которых не может быть обеспечено требованиями, указанными в стандарте; электрических цепей, замкнутых внутри электрических машин; аппаратов; устройств измерения, контроля, сигнализации и управления, электрифицированного транспорта. Но и в перечисленных случаях, когда это возможно, должны использоваться стандартные напряжения.

В диапазоне до 1000 В для четырехпроводной сети переменного тока два числовых значения номинального напряжения записываются с дробной чертой, например 380/220 В, что означает соответственно линейное (в числителе) и фазное (в знаменателе) напряжения.

В табл. 10.1 приведены номинальные значения напряжения систем электроснабжения, источников, преобразователей, сетей и присоединяемых к ним приемников электрической энергии, установленные ГОСТ 21128-83 в вольтах.

Стандартом дополнительно к приведенным в таблице допускаются применение отдельных значений номинальных напряжений с указанием области или условий их применения, согласованных в надлежащем порядке.

Номинальные напряжения свыше 1000 В. Для электроснабжения потребителей электрической энергией в современных условиях используются почти исключительно трехфазные системы токов.

ГОСТ 721-77 устанавливает номинальные значения линейных напряжений трехфазных цепей свыше 1000 В электрических сетей, источников и приемников электрической энергии общего назначения, а также их наибольшие линейные рабочие напряжения, длительно допустимые по условиям работы изоляции электрооборудования для каждого класса напряжения (табл. 10.2).

Классы напряжения, указанные в скобках, для вновь проектируемых сетей не рекомендуются. На эти напряжения электрооборудование изготавливается только для существующих и расширяющихся сетей.

Для электрооборудования, применяемого в угольной промышленности, кроме напряжений трехфазных цепей, указанных в табл. 10.2, применяются напряжения 1140 В для приемников и 1200 В для источников.

Номинальные частоты. Электроэнергия в на-

шей стране производится главным образом в виде переменного тока стандартной частоты 50 Гц. Часть производимой энергии этой частоты преобразуется для технологического использования и других целей в переменный ток повышенной (более 50 Гц) и частично пониженной (менее 50 Гц) частот. Мощность установок, работающих на час-

Таблица 10.2. Классы напряжения электрооборудования: действующее значение напряжения, кВ

Класс напряжения электрооборудования	Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования	Номинальное напряжение электрической сети	Наибольшее длительное допустимое рабочее напряжение в электрической сети
(3)	3,6	3,0 3,15 3,3	3,5 3,5 3,6
6	7,2	6,0 6,6	6,9 7,2
10	12,0	10,0 11,0	11,5 12,0
15	17,5	13,8 15,0 15,75	15,2 17,5 17,5
20	24,0	18,0 20,0 22,0	19,8 23,0 24,0
24	26,5	24,0	26,5
27	30,0	27,0	30,0
35	40,5	35,0	40,5
110	126,0	110,0	126,0
(150)	172,0	150,0	172,0
220	252,0	220,0	252,0
330	363,0	330,0	363,0
500	525,0	500,0	525,0
750	787,0	—	—
1150	1200,0	—	—

Примечания: 1. Классы напряжения 3 и 150 кВ допускаются только для существующих сетей.
2. Классы напряжения 15, 24 и 27 кВ допускаются для турбогенераторов мощностью 100 МВт и выше, гидрогенераторов 50 МВт и выше, синхронных компенсаторов 160 Мвар и выше.

тотах, отличающихся от 50 Гц, в пределах до 10 кГц достигает сотен мегаватт.

Номинальные значения частот, установленные ГОСТ 6697-83:

для источников энергии: 50, 400, 1000, 6000, 10 000 Гц;

для преобразователей и приемников электрической энергии: 50, 400, 1000, 2000, 4000, 6000, 10 000 Гц.

Дополнительно согласно стандарту допускается применение следующих частот:

для электроинструмента, электроприводов центрифуг, сепараторов и деревообрабатывающих станков 100, 150, 200, 300 Гц;

для электротермического оборудования 500, 2400, 8000 Гц;

для корабельных навигационных гироскопических устройств 500 Гц.

Все указанные номинальные частоты кратны основной частоте тока.

Преимущественное фактическое применение частот, предусмотренных ГОСТ 6697-83:

50 Гц — стандартная промышленная частота;

100, 150 Гц — электропривод деревообрабатывающих станков;

200 Гц — переносный электроинструмент, нужды полиграфической промышленности и ряд технологических процессов электронагрева;

300 Гц — электропривод в машиностроении;

400 и частично 500 Гц — для гироскопических приборов;

1000, 2000 и частично 2400 Гц — электропривод в машиностроении и в технологических процессах нагрева и плавки металлов;

остальные частоты ряда — преимущественно плавка металлов и сплавов.

В ГОСТ 6697-83 установлены допускаемые отклонения от номинальных значений частот систем электроснабжения, источников, преобразователей и приемников электроэнергии: 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 10%*.

Допускаемые отклонения от номинальных значений частот могут быть: двусторонние симметричные ($\pm$); односторонние (+) или (−); несимметричные.

Указанные допускаемые отклонения не распространяются на электрические станции и сети общего назначения частотой 50 Гц, где качество энергии нормируется ГОСТ 13109-87.

Ряд номинальных токов. ГОСТ 6827-76 распространяется на электрические приборы, оборудование и приемники электрической энергии, для которых основным параметром является номинальный ток, а также на части электротехнических устройств, которые по своей конструкции и назначению рассчитаны на другие номинальные токи, отличающиеся от номинальных токов электротех-

нических устройств, например на контакты реле, вспомогательные контакты.

Стандарт устанавливает номинальные значения постоянного и переменного токов от 0,0001 до 250 000 А с частотой до 10 000 Гц в нормальных и установившихся режимах работы электрических приборов, оборудования и приемников электрической энергии. Стандарт не устанавливает номинальные значения токов для: переходных процессов; электрооборудования технологических процессов, осуществление которых не может быть обеспечено требованиями настоящего стандарта;

Т а б л и ц а 10.3

Номинальный ток, А	Номинальный ток, А	Номинальный ток, А
0,001	0,80	(2250)
0,0002	1,00	2500
0,0003	1,25	3150
0,0004	1,60	4000
0,0005	2,00	5000
0,0006	2,50	6300
0,0008	3,15	8000
0,0010	4,00	10 000
0,0012	5,00	(11 200)
0,0016	6,30	12 500
0,0020	8,00	(14 000)
0,0025	10,0	16 000
0,0030	12,5	(18 000)
0,0040	16,0	20 000
0,0050	20,0	(22 500)
0,0060	25,0	25 000
0,0080	31,5	(28 000)
0,010	40,0	31 500
0,012	50,0	(35 500)
0,016	63,0	40 000
0,020	80,0	(45 000)
0,025	100	50 000
0,030	125	(56 000)
0,040	160	63 000
0,050	200	(71 000)
0,060	250	80 000
0,080	315	100 000
0,108	400	(112 000)
0,125	500	125 000
0,16	630	(140 000)
0,20	800	160 000
0,25	1000	(180 000)
0,315	1250	200 000
0,40	(1400)	(225 000)
0,50	1600	250 000
0,63	2000	

П р и м е ч а н и я : 1. Значения токов, указанные в скобках, в новых разработках применять не следует.

2. Для плавких вставок предохранителей низкого напряжения допускается применять значение тока 35 А, которое заменяет 31,5 и 40 А.

3. Для трансформаторов тока допускается применять в дополнение к указанным следующие значения токов: 15, 30, 60, 75 и 120 А.

* В технически обоснованных случаях по согласованию с головной организацией по стандартизации и основным заказчиком.

цепей, замкнутых внутри электрических машин, аппаратов и подобных им изделий; цепей и устройств измерения, контроля, сигнализации и управления; элементов тепловых реле; катушек электрических аппаратов; аппаратов и трансформаторов тока, предназначенных для измерения токов источников электрической энергии и преобразовательных агрегатов на номинальные токи свыше 10 000 А; бортового электрооборудования постоянного и переменного тока летательных аппаратов и специальных транспортных машин.

В перечисленных случаях номинальные токи следует по возможности выбирать из приведенных в указанном стандарте.

Из приведенных значений номинальных токов до 1000 А (табл. 10.3) предпочтительными являются следующие: 1,00; 1,60; 2,50; 4,00; 6,30 А, а также десятичные кратные и дольные значения этих токов.

Номинальные токи 0,125; 0,315; 0,63; 3,15; 6,30; 12,5; 31,5 А можно округлять до следующих значений: 0,12; 0,30 или 0,32; 3,0 или 3,2; 6,00; 12,0; 32,0 А. Токи менее 0,1 А округляются аналогично.

ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Обеспечение защиты электрооборудования от внешних механических и климатических воздействий определяется следующими основными стандартами:

ГОСТ 14254-80. «Изделия электротехнические. Оболочки. Степени защиты. Обозначения. Методы испытаний». Этот стандарт распространяется на изделия с номинальным напряжением не более 72,5 кВ.

ГОСТ 17494-87 «Машины электрические вращающиеся. Классификация степеней защиты, обеспечиваемых оболочками вращающихся электрических машин».

ГОСТ 14255-69 «Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Оболочки. Степени защиты».

ГОСТ 15150-69. «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории условий эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

ГОСТ 15151-69 «Машины, приборы и другие технические изделия для районов с тропическим климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 15543-70 «Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Общие технические требования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

ГОСТ 17412-72 «Изделия электротехнические для районов с холодным климатом. Общие технические условия».

ГОСТ 16962-71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний».

ГОСТ 16962.2-90Е «Изделия электротехниче-

ские. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам».

ГОСТ 17516-72 «Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды».

ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Стандартизация основных электротехнических терминов определяется следующими документами:

ГОСТ 19880-74 «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения». Приведены термины и основные понятия в области электромагнитных явлений; термины электрических, электронных и магнитных цепей; термины электромагнитных процессов в электрических и магнитных цепях и средах и др.

ГОСТ 19431-84 «Энергетика и электрификация. Термины и определения». Установлены термины и определения, относящиеся к энергообеспечению и электроснабжению; видам электрических станций; линиям электропередачи, электрическим сетям и тепловым сетям; видам приемников и потребителей энергии; характеристикам производства и потребления электроэнергии и тепловой энергии и т.д.

ГОСТ 18311-80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий». Даны общие понятия, виды электротехнических изделий, устройств и оборудования, параметры, свойства и характеристики.

Обозначения основных электротехнических величин определяются ГОСТ 1494-77 «Электротехника. Буквенные обозначения основных величин», где приведены также наиболее употребительные индексы.

10.2. НАДЕЖНОСТЬ. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Надежность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Работоспособное состояние (работоспособность) — состояние объекта, при котором значения всех его параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Неработоспособное состояние (неработоспособность) — состояние объекта, при котором значение хотя бы одного его параметра,

характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Надежность — качественное понятие, но теория надежности (ТН) как инженерная дисциплина должна опираться на количественные оценки — показатели надежности (количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта).

Невосстанавливаемый объект — объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в НТД.

Далее рассматривается поведение генеральной или выборочной совокупности объектов определенного типа в определенных условиях эксплуатации, оговоренных НТД. При этом аргументом рассматриваемых ниже функций (или функционалов) — показателей надежности является время T , отсчитываемое от момента начала эксплуатации $t = 0$ до момента его отказа $t = T$.

Величину T принято называть: наработка до отказа, время безотказной работы, время жизни объекта.

Примечание. Для некоторых объектов наработка до отказа может измеряться не временем, а объемом работы, проделанной объектом (например: длиной пути (для транспортных средств), числом включений и т.п.). Далее для конкретности под наработкой до отказа будет подразумеваться именно величина T .

Исходным положением ТН является допущение, что T — непрерывная случайная величина (СВ). Случайность T обусловлена, по крайней мере, двумя причинами:

1. Рассматривается совокупность формально идентичных объектов (идентичных с точки зрения НТД), однако с физической точки зрения элементы рассматриваемой совокупности различны, но это различие мы либо не можем, либо не вправе замечать (к началу эксплуатации все объекты данного типа удовлетворяют требованиям НТД и с этой точки зрения являются идентичными, однако в силу их реального физического различия отказы объектов будут возникать в различное, случайное для внешнего наблюдателя, время).

2. Условия эксплуатации также по существу случайны, поскольку НТД ограничивает лишь допустимые пределы изменения физических величин, характеризующих условия эксплуатации (внутри этих пределов указанные величины — случайные функции времени).

Исходя из вышесказанного T — неотрицательная непрерывная СВ и, следовательно, полностью определяется (задается) своей функцией или плотностью распределения:

$$F(t) = \text{Вер}[T < t], F(0) = 0, F(\infty) = 1, t \geq 0,$$

$$\varphi(t) = dF(t) / dt, \varphi(t) \geq 0, \int_0^{\infty} \varphi(t) dt = 1, t \geq 0$$

(здесь и далее $\text{Вер}[A]$ — вероятность события A). $F(t)$ или $\varphi(t)$ дают полную информацию о СВ T , однако для удобства анализа и (или) расчета различных типов объектов в различных условиях эксплуатации в ТН используется ряд специальных показателей надежности, которые, естественно, однозначно выражаются через $F(t)$ или $\varphi(t)$. Основные из них приводятся ниже.

Интенсивность отказов $\lambda = \lambda(t)$ — условная плотность распределения T при условии, что до рассматриваемого момента времени t отказ не возник. Из данного определения следует:

$$\lambda(t) = \varphi(t) / (1 - F(t)).$$

Наиболее распространенная размерность λ : ч^{-1} (в американской литературе в качестве единицы λ иногда используется т.н. ФИТ (FIT), равный 10^{-9} ч^{-1}).

Для широкого класса электротехнических и электронных компонентов и устройств функция $\lambda(t)$ имеет вид, приведенный на рис. 10.1, где выделяются три характерных участка.

Π ($d\lambda/dt < 0$) — период приработки («детство» объекта), обусловленный в основном дефектами изготовления, не выявленными на этапах выходного и (или) входного контроля. Для изделий ответственного назначения участок Π обычно стремятся исключить из практической эксплуатации за счет так называемых «тренировочных» или «отбраковочных» испытаний (для компонентов) или периода опытной эксплуатации — наладочных испытаний (для сложных объектов). Н ($\lambda = \text{const}$) — этап нормальной (рабочей) эксплуатации («зрелый возраст»). Здесь вероятность отказа практически не зависит от предыстории объекта. С ($d\lambda/dt > 0$) — этап «старения» — проявление необратимых физико-химических изменений в структуре объекта, приводящих к его отказу; объекты ответственного назначения обычно снимаются с эксплуатации до наступления этого этапа.

Однако в общем случае $\lambda(t)$ может включать в себя все три выделенных участка. Отметим, что величина λ существенным образом зависит от условий эксплуатации объекта: см., например, [10.8].

Вероятность безотказной работы (функция надежности): $P = P(t)$ — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не наступает, или вероятность того, что объект проработает безотказно в течение интервала $(0, t)$:

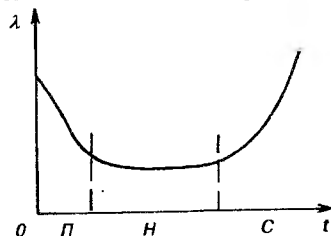


Рис. 10.1

$$P = P(t) = \text{Вер}[T > t] = 1 - F(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right),$$

откуда $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$, $dP(t)/dt \leq 0$.

Вероятность отказа (функция ненадежности): $Q = Q(t)$ — вероятность того, что в пределах заданной наработки происходит отказ объекта, или вероятность того, что объект откажет на интервале $(0, t)$:

$$Q = Q(t) = \text{Вер}[T < t] = F(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right),$$

откуда $Q(0) = 0$, $Q(\infty) = 1$, $dQ(t)/dt \geq 0$.

Вероятность отказа на интервале (t_0, t) (интервальная функция ненадежности): $Q(t_0, t)$ — условная вероятность того, что отказ объекта наступит ранее t при условии, что к моменту t_0 объект был работоспособен (т. е. объект уже проработал безотказно на интервале $(0, t_0)$). Из данного определения с учетом определения условной вероятности следует:

$$Q(t_0, t) = (Q(t) - Q(t_0)) / (1 - Q(t_0)) = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^t \lambda(t) dt\right).$$

Вероятность безотказной работы на интервале (t_0, t) (интервальная функция надежности): $P(t_0, t) = 1 - Q(t_0, t)$ — условная вероятность того, что отказ объекта наступит позже t при условии, что объект уже проработал безотказно на интервале $(0, t_0)$.

Соотношение между $P(t)$ и $P(t_0, t)$, $Q(t)$ и $Q(t_0, t)$, показанное на рис. 10.2, является следствием получения дополнительной информации о состоянии объекта в момент времени t_0 .

Средняя наработка до отказа (среднее время жизни) и дисперсия наработки определяются:

$$\tau = M[T] = \int_0^{\infty} t \varphi(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt;$$

$$\sigma^2 = M[(T - \tau)^2] = \int_0^{\infty} t^2 \varphi(t) dt - \tau^2.$$

Гамма-процентная наработка t_γ : наработка, которую имеет или превышает в среднем обусловленное число γ -процентов экземпляров объектов данного типа, откуда следует $\text{Вер}[T > t_\gamma] = 0,01\gamma$ или $Q(t_\gamma) = F(t_\gamma) = 1 - 0,01\gamma$, иначе говоря, t_γ — квантиль распределения T при вероятности, равной $1 - 0,01\gamma$.

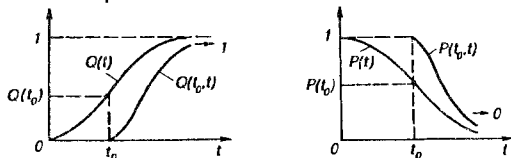


Рис. 10.2

ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Исходные определения и обозначения. Состояние объекта — любое определенное сочетание его работоспособных и отказавших, в том числе восстанавливаемых, элементов. Коль скоро рассматриваемая модель объекта содержит конечное число элементов, то множество его состояний (МС) дискретно и конечно.

$PC \subset MC$ — подмножество работоспособных состояний объекта — состояний, пребывание в которых отвечает работоспособности объекта.

$OC \subset MC$ — подмножество состояний отказа объекта — состояний, пребывание в которых отвечает отказу объекта.

$\pi_i(t)$ — вероятность пребывания объекта в состоянии i в момент времени t .

$\Lambda_{ik}(t)$ — интенсивность перехода объекта из состояния i в состояние k .

Исходя из вышесказанного можно определить следующие показатели надежности.

Показатели восстановления. *Время восстановления T_B* — время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причин отказа и устранение последствий отказа. Если T_B — случайная величина, то $F_B(t) = \text{Вер}[T_B < t]$ — ее функция распределения; при этом

$$\mu = \mu(t) = F_B'(t) / (1 - F_B(t))$$

— *интенсивность восстановления*;

$$\tau_B = M[T_B] = \int_0^{\infty} (1 - F_B(t)) dt$$

— *среднее время восстановления*.

Показатели надежности объекта. *Параметр потока отказов $\omega = \omega(t)$* : плотность распределения отказов восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени,

$$\omega = \omega(t) = \sum_{i \in PC} \sum_{k \in OC} \Lambda_{ik}(t) \pi_i(t).$$

Среднее количество отказов объекта на интервале времени $(0, t)$,

$$\Omega = \Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt.$$

Коэффициент готовности (функция готовности): $\Gamma = \Gamma(t)$ — вероятность того, что объект окажется работоспособным в рассматриваемый момент времени,

$$\Gamma = \Gamma(t) = \sum_{i \in PC} \pi_i(t).$$

Коэффициент простоя (функция простоя): $\Pi = \Pi(t)$ — вероятность того, что объект окажется неработоспособным в рассматриваемый момент времени,

$$\Pi = \Pi(t) = \sum_{i \in OC} \pi_i(t) = 1 - \Gamma(t).$$

Стационарные коэффициенты готовности и простоя:

$$K\Gamma = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t), \quad K\Pi = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pi(t).$$

Суммарное среднее время пребывания объекта в каком-либо из состояний, например в состоянии восстановления (ремонта) i -го компонента

$$\tau_i = \tau_i(t) = \int_0^t \pi_i(t) dt,$$

где $\pi_i(t)$ — вероятность пребывания объекта в i -м состоянии (например, в состоянии ремонта i -го компонента).

Суммарная средняя наработка объекта на интервале времени $(0, t)$

$$\tau_p = \tau_p(t) = \int_0^t \Gamma(t) dt.$$

Суммарное среднее время простоя (ремонта) объекта на интервале времени $(0, t)$

$$\tau_{\Pi} = \tau_{\Pi}(t) = \int_0^t \Pi(t) dt.$$

Функция ненадежности восстанавливаемого объекта $Q = Q(t)$ — вероятность первого попадания объекта в отказовое состояние из произвольного работоспособного начального состояния,

$$dQ = Q(t) = \text{Вер} [T < t] = F(t) = \pi_{\text{кп}}(t),$$

где кп — индекс квазипоглощающего состояния, представляющего собой объединение всех состояний отказов объекта в одно поглощающее состояние путем приравнивания нулю всех интенсивностей переходов, ведущих из подмножества отказовых состояний; T — наработка до отказа преобразованной указанным образом структуры объекта; $F(t)$ — функция распределения T (к величине T применимы все показатели надежности для невосстанавливаемых объектов).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Указанные выше определения показателей надежности являются вероятностными. Экспериментальная оценка этих показателей (как точечная, так и интервальная) осуществляется на основе известных методов математической статистики. Планы соответствующих испытаний на надежность и методы обработки их результатов рассматриваются, например, в [10.2, 10.9] и нормируются в [10.3].

ТИПОВЫЕ АППРОКСИМАЦИИ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ КОМПОНЕНТОВ

Среди сравнительно небольшого числа находящихся практическое применение законов распределения остановимся лишь на двух наиболее распространенных.

Для нестареющих компонентов, когда интенсивность отказов можно считать практически неизменной (см. участок H на рис. 10.1), закон

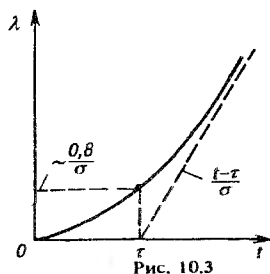


Рис. 10.3

распределения наработки до отказа можно принять экспоненциальным

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

для которого $\tau = \sigma = \lambda^{-1}$.

Для отображения стареющих компонентов можно использовать аппроксимацию нормальным законом распределения

$$F(t) = F_{\text{н}}(t) = F_0((t - \tau)/\sigma),$$

где $F_0(x) = \int_{-\infty}^x \varphi_0(x) dx$; $\varphi_0(x) = (2\pi)^{-0.5} e^{-0.5x^2}$ —

табулированная функция нормированного нормального распределения.

Необходимо отметить, что $F_{\text{н}}(t)$ отлична от нуля при $t = 0$, в то время как функция наработки до отказа определена только для $t \geq 0$ и при этом должно выполняться условие $F(0) = 0$, что несправедливо для $F_{\text{н}}(t)$. Поэтому необходимо использовать в качестве аппроксимации формулу усеченного нормального закона

$$F(t) = F_{y,\text{н}}(t) = \left(F_0\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) - F_0\left(-\frac{\tau}{\sigma}\right) \right) / \left(1 - F_0\left(-\frac{\tau}{\sigma}\right) \right).$$

Если однако имеет место $\tau/\sigma > 4 \div 5$, то «усеченностью» можно пренебречь и использовать приведенную выше формулу «обычного» нормального закона.

При этом интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \sigma^{-1} \varphi_0\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) / \left(1 - F_0\left(-\frac{\tau}{\sigma}\right) \right).$$

Соответствующий график приведен на рис. 10.3, где $\lambda(t)$ монотонно увеличивается, отображая тем самым процесс старения объекта.

Помимо рассмотренных в ТН используются также аппроксимирующие распределения: Вейбулла, гамма, логарифмически нормальное и некоторые другие [10.4, 10.5, 10.9].

10.3. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

СТАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. БУЛЕВА МОДЕЛЬ

С точки зрения методики расчета целесообразно различать следующие два класса систем: системы с независимыми отказами (СНО), когда показатели надежности любого элемента не зависят от

надежностного состояния (работоспособное или неработоспособное) любых других элементов данной системы; системы с зависимыми отказами (СЗО), где указанное условие не выполняется.

При расчете СНО можно избежать применения дифференциальных уравнений, и поэтому системы этого типа можно назвать статическими.

Понятие структурной функции надежности (СФН). Пусть $Y = Y(t)$ — случайная двоичная переменная, отображающая состояние системы так, что $Y = 1$, если система работоспособна, и $Y = 0$, если система неработоспособна. При этом

$$P = P(t) = \text{Вер}[Y(t)=1]; Q = Q(t) = \text{Вер}[Y(t)=0]$$

— функции надежности и ненадежности системы.

Пусть $x_i = x_i(t)$ — случайная двоичная переменная, отображающая состояние i -го элемента данной системы так, что $x_i = 1$, когда i -й элемент работоспособен, и $x_i = 0$ в противном случае ($i = 1, n$, где n — общее число элементов системы); при этом —

$p_i = p_i(t) = \text{Вер}[x_i(t)=1]; q_i = q_i(t) = \text{Вер}[x_i(t)=0]$ — функции надежности и ненадежности i -го элемента системы.

В указанных обозначениях СФН

$$Y = S(X), X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T,$$

— отображение области определения случайного булева вектора X с независимыми компонентами на область значений случайной булевой величины Y .

Таким образом, функция СФН позволяет для любого набора работоспособных и отказавших элементов системы (т. е. для любой допустимой реализации вектора X) определить, является ли система работоспособной или неработоспособной, следовательно, СФН задает структурную связь между элементами системы с точки зрения ее надежности, иначе говоря, однозначно определяет надежностную структуру системы. СФН может быть задана любым из известных способов задания функции алгебры логики (ФАЛ): S — словесное описание, T — таблица, Φ — формула булевой алгебры.

Пример. S — система состоит из трех элементов и сохраняет работоспособность тогда и только тогда, когда работоспособны не менее двух любых ее элементов (например, трехсекционная система эскалаторов метро); T : см. табл. 10.4; пример Φ :

$$\begin{aligned} Y &= x_1 \wedge x_2 \vee x_1 \wedge x_3 \vee x_2 \wedge x_3 = \\ &= (x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3) = \\ &= x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \vee \bar{x}_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \vee x_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge x_3 \vee x_1 \wedge x_2 \wedge \bar{x}_3 = \\ &= (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (\bar{x}_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (x_1 \vee \bar{x}_2 \vee x_3) \wedge \\ &\quad \wedge (x_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3). \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 10.4

x_1	x_2	x_3	Y
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0

Предпоследняя форма представления СФН — дизъюнктивная совершенная нормальная форма ФАЛ-ДСНФ, а последняя — конъюнктивная совершенная нормальная форма ФАЛ-КСНФ.

Помимо указанных общепринятых способов задания ФАЛ в теории надежности широко принят также графический способ отображения СФН — так называемая структурная схема надежности (ССН). ССН представляет собой граф, ветви которого отображают элементы системы так, что при работоспособном состоянии элемента отображающая его ветвь принимается замкнутой (проводящей), в противном случае — разомкнутой (непроводящей). В ССН выделяются два граничных узла α и β . Если между ними имеется хотя бы один замкнутый путь, то система полагается работоспособной, в противном случае — неработоспособной. ССН может либо вытекать из СФН, либо выполнять роль первичной, исходной информации о надежностной структуре системы. В обоих случаях между СФН и ССН имеет место взаимно однозначное соответствие (поскольку всегда существует взаимно однозначное соответствие между ССН и СФН, представленными в форме ДСНФ или КСНФ, устанавливаемое с помощью табличного задания ФАЛ). Примеры подобных соответствий приведены в табл. 10.5, где ПС — последовательная ССН; ПР — параллельная ССН; ППН — пример последовательно-параллельной СФН с независимыми параллельными и последовательными подсхемами (две любые подсхемы ССН называются взаимно независимыми, если они не имеют общих элементов, т. е. не имеют ветвей с одинаковыми индексами, в противном случае они называются зависимыми); ППЗ — примеры последовательно-параллельных ССН с зависимыми подсхемами; НПП — пример ССН не параллельно-последовательного типа (так называемая мостиковая ССН — единственно возможная НПП из пяти элементов).

Сформулируем теперь задачу, указанную в заголовке §10.3.

Исходные данные: СФН системы — в любой форме; функции надежности $p_i = p_i(t)$ или ненадежности $q_i = q_i(t)$ всех элементов системы $i = 1, n$.

Требуется определить функции надежности или ненадежности системы: $P = P(t)$ или $Q = Q(t)$ (любая из этих функций позволяет определить любые другие показатели системы — см. §10.2).

Рассмотрим возможные методы решения.

Метод приведения к ДСНФ. Первый шаг — СФН в заданной (произвольной) форме переводится в ДСНФ:

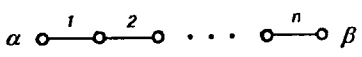
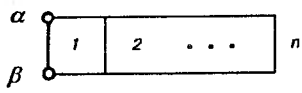
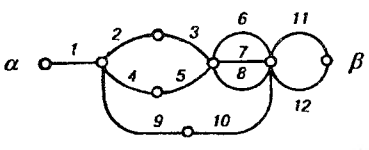
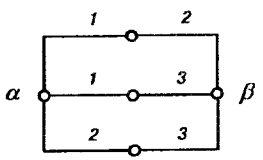
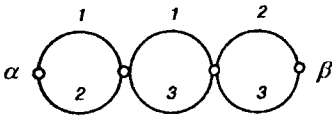
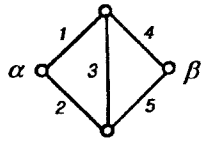
$$Y = S(x_1, \dots, x_n; \vee, \wedge) = S_D(x_1, \bar{x}_1, \dots, x_n, \bar{x}_n; \vee, \wedge).$$

Второй шаг — путем следующей замены символов в последнем равенстве $Y \rightarrow P$, $x_i = p_i$, $\bar{x}_i = 1 - p_i = q_i$, $\vee \rightarrow +$, $\wedge \rightarrow \cdot$ определяется искомая функция надежности системы

$$P = P(p_1, \dots, p_n) = S_D(p_1, 1 - p_1, \dots, p_n, 1 - p_n; +, \cdot).$$

Например, для последовательной ССН (табл. 10.5) ДСНФ

Т а б л и ц а 10.5

Структурная схема надежности	Структурная функция надежности	Тип
	$\bigwedge_{i=1}^n x_i$	ПС
	$\bigvee_{i=1}^n x_i$	ПР
	$x_1 \wedge (((x_2 \wedge x_3) \vee (x_4 \wedge x_5)) \wedge (x_6 \vee x_7 \vee x_8)) \vee \vee (x_9 \wedge x_{10})) \wedge (x_{11} \vee x_{12})$	ППН
	$(x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_3)$	ППЗ
	$(x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee x_3)$	ППЗ
	$x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 x_5 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4 x_5 \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 x_5 \vee$ $\vee x_1 x_2 x_3 \bar{x}_4 x_5 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4 x_5 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 x_5 \vee$ $\vee x_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 \bar{x}_5 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4 x_5 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 x_5 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4 x_5 \vee$ $\vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 x_5 \vee x_1 x_2 x_3 \bar{x}_4 x_5 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 x_5 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 x_5$	НПП

$$Y = \bigwedge_{i=1}^n x_i \rightarrow P = \prod_{i=1}^n p_i.$$

Метод приведения к КСНФ. Первый шаг — СФН в заданной (произвольной) форме переводится в КСНФ, преобразованную затем по правилу де Моргана в эквивалентную инверсную форму:

$$Y = S(x_1, \dots, x_n) = S_k(\overline{x_1}, x_1, \dots, \overline{x_n}, x_n; \wedge, \vee).$$

Второй шаг — путем следующей замены символов в последнем равенстве: $\overline{Y} \rightarrow Q, \overline{x_i} \rightarrow q_i, x_i \rightarrow 1 - q_i = p_i, \vee \rightarrow +, \wedge \rightarrow \cdot$ определяется искомая функция ненадежности системы

$$Q(q_1, \dots, q_n) = S_k(q_1, 1 - q_1, \dots, q_n, 1 - q_n, \cdot, +).$$

Например, для параллельной ССН (см. табл. 10.5) КСНФ

$$Y = \bigvee_{i=1}^n x_i \rightarrow \overline{Y} = \bigwedge_{i=1}^n \overline{x_i} \rightarrow Q = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Методы приведения к ДСНФ и КСНФ являются универсальными алгоритмами решения задачи (пригодными для любой СФН), а их трудоемкость зависит от возможных для конкретной задачи способов приведения ФАЛ к ДСНФ или КСНФ. Если используется универсальный табличный способ, то трудоемкость указанных методов не меньше трудоемкости так называемых методов прямого перебора работоспособных или неработоспособных состояний (ПРС или ПНС).

Алгоритм ПРС. Шаг 1 — составляется таблица всех возможных работоспособных состояний системы (всех возможных реализаций вектора X , для которых $Y = S(X) = 1$).

Шаг 2 — определяется вероятность каждого перечисленного состояния по правилу умножения вероятностей независимых событий

$$P_\rho = \prod_{i \in \rho 1} p_i \prod_{k \in \rho 0} q_k; \rho = \overline{1, R},$$

где ρ — текущее значение индекса работоспособного состояния; R — общее количество работоспособных состояний; $i \in \rho 1$ — произведение берется по всем элементам, работоспособным в состоянии ρ (т. е. для всех i , для которых $x_i = 1$ в состоянии ρ); $k \in \rho 0$ — произведение берется по всем элементам, неработоспособным в состоянии ρ (т. е. для всех k , для которых $x_i = 0$ в состоянии ρ).

Шаг 3 — определяется искомая функция надежности системы по правилу сложения вероятностей несовместимых событий

$$P = \sum_{\rho=1}^R P_\rho.$$

Например, для обеих систем ППЗ, приведенных в табл. 10.5, имеется четыре работоспособных состояния: (1, 1, 1), (110), (101), (011); таким образом, получаем:

$$P = p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 q_3 + p_1 q_2 p_3 + q_1 p_2 p_3.$$

Алгоритм ПНС. Шаг 1 — составляется таблица всех возможных неработоспособных состояний си-

стемы (всех возможных реализаций вектора X , для которых $Y = S(X) = 0$).

Шаг 2 — определяется вероятность каждого перечисленного состояния по правилу умножения вероятностей независимых событий

$$Q_\nu = \prod_{i \in \nu 1} p_i \prod_{k \in \nu 0} q_k, \nu = \overline{1, N},$$

где ν — текущее значение индекса неработоспособного состояния; N — общее число неработоспособных состояний; $i \in \nu 1$ — произведение берется по всем элементам, работоспособным в состоянии ν (т. е. для всех i , для которых $x_i = 1$ в состоянии ν), $k \in \nu 0$ — произведение берется по всем элементам, неработоспособным в состоянии ν (т. е. для всех k , для которых $x_i = 0$ в состоянии ν).

Шаг 3 — определяется искомая функция ненадежности системы по правилу сложения вероятностей несовместимых событий

$$Q = \sum_{\nu=1}^N Q_\nu.$$

Например, для обеих систем ППЗ, приведенных в табл. 10.5, имеется четыре неработоспособных состояния: (0, 0, 0), (0, 0, 1), (0, 1, 0), (1, 0, 0); таким образом, получаем:

$$Q = q_1 q_2 q_3 + q_1 q_2 p_3 + q_1 p_2 q_3 + p_1 q_2 q_3.$$

Если из качественных (эвристических) соображений заранее известно, что $R < N$ (наиболее типичный случай), то следует использовать ПРС; если $R > N$, используют ПНС.

Рассмотренные алгоритмы прямого перебора состояний системы предельно элементарны и весьма просто реализуются на ЭВМ, единственным (хотя и весьма существенным) ограничением их практического осуществления являются расходуемые объемы машинного времени и памяти, поскольку общее количество состояний системы показательно увеличивается с ростом количества ее элементов: $N + R = 2^n$.

Сравнивая методы ДСНФ, КСНФ и ПРС, ПНС, отметим следующее. Оба метода в своей математической основе идентичны и отличаются по существу лишь формой записи. Методы ДСНФ, КСНФ могут иметь практическое преимущество по сравнению с прямым перебором лишь в тех случаях, когда переход от исходно заданной формы СФН к ДСНФ или КСНФ можно реализовать каким-либо более экономичным способом, чем путем известного универсального алгоритма составления ДСНФ или КСНФ через табличное представление ФАЛ СФН. Поскольку таких иных, более простых, универсальных алгоритмов не существует, то здесь можно рассчитывать лишь на частные случаи исходного представления СФН, когда возможны какие-либо более простые методики составления ДСНФ или КСНФ; таким предельно простым частным случаем является ситуация, когда СФН исходно задана в форме ДСНФ или КСНФ. Здесь, однако, следует отметить, что представление СФН в форме ДСНФ, КСНФ может быть и обычно бывает существенно более громозд-

ким, чем графическое отображение СФН в форме ССН; подтверждением сказанного служит пример системы НПП, приведенной в табл. 10.5.

Рассмотрим методы расчета граничных оценок функций надежности и ненадежности для НПП систем, основанные на некоторых топологических свойствах графа ССН. Введем следующие определения.

Минимальный путь (МП) — подмножество ребер графа ССН, которое позволяет, переходя от одной ветви к другой через инцидентную им обоим вершину, пройти между граничными узлами системы, но при этом исключение хотя бы одной ветви из этого подмножества делает такой переход невозможным; либо в терминах СФН: реализация X' вектора X называется МП, если $S(X') = 1$, но для любой реализации X'' , такой, что при $X'' < X'$ $S(X'') = 0$.

Минимальный разрез (МР) — подмножество ветвей графа ССН, разрыв которых делает невозможным переход между граничными узлами системы, но при этом замыкание хотя бы одной ветви из этого подмножества восстанавливает возможность указанного перехода; либо в терминах СФН: реализация X' вектора X называется МР, если $S(X') = 0$, но для любой реализации X'' такой, что при $X'' > X'$ $S(X'') = 1$.

Знание всех МП и МР позволяет формально упростить выражение, для СФН системы и получить аналитические выражения для функций надежности и ненадежности. Однако реальная трудоемкость такого решения практически не отличается от трудоемкости метода прямого перебора [11.11]. Задача упрощается, если можно удовлетвориться граничными оценками искомых функций. Один из возможных вариантов подобной оценки:

$$Q_H < Q < Q_B;$$

$$Q_H = \prod_{\nu \in \text{ММП}} (1 - P_{\nu \text{МП}}); \quad P_{\nu \text{МП}} = \prod_{i \in \text{МПП}} p_i;$$

$$Q_B = \prod_{\mu \in \text{ММР}} (1 - Q_{\mu \text{МР}}); \quad Q_{\mu \text{МР}} = \prod_{i \in \text{МПП}} q_i,$$

где ММП, ММР — множества всех МП, МР. Подобный подход к анализу НПП систем наиболее полно излагается в [10.11].

Все сказанное выше не относится к системам типа ППН (так называемым «приводимым» системам — [10.11]). Здесь нет необходимости прибегать к СФН, как правило, проще исходить непосредственно из ССН, используя приведенные выше соотношения: $P = \prod_i p_i$ для последовательных подсхем и $Q = \prod_i q_i$ — для параллельных. Задача

решается путем поочередного поступательного свертывания последовательных и параллельных подсхем по приведенным формулам до тех пор, пока система не сведется к одному эквивалентному элементу, заключенному между граничными узлами α, β . При этом функции работоспособности и неработоспособности этого элемента суть соответствующие функции рассчитываемой системы. Например, для ССН типа ППН, приведен-

ной в табл. 10.5, получаем: $P = p_1 p_{17} p_{18}$, где $p_{17} = 1 - (1 - p_{15})(1 - p_{16})$; $p_{15} = p_9 p_{10}$; $p_{16} = p_{13} p_{14}$; $p_{13} = 1 - (1 - p_2 p_3)(1 - p_4 p_5)$; $p_{14} = 1 - q_6 q_7 q_8$; $p_{18} = 1 - q_{11} q_{12}$.

Рассмотрим особенности расчета надежности систем на двоичных логических (ДЛ) элементах и на переключающих двухполюсных (ДП) элементах с учетом двух типов их отказов: «ложный нуль» — Л0 (для ДП это отказы типа «обрыв», ложное несрабатывание и т. п.) и «логичная единица» — Л1 (для ДП это отказы типа «короткое замыкание», «ложное срабатывание» и т. п.).

Введем следующие обозначения: q_0, q_1 — вероятности отказов элемента Л0 и Л1; события «Л0», «Л1» несовместны и в совокупности с событием «элемент работоспособен» образуют полную группу; при этом результирующая вероятность отказа элемента $q = q_0 + q_1$, $p = 1 - q$; $q(t)$ — функция ненадежности элемента; ε — относительная доля отказов Л1, при этом $q_1 = \varepsilon q(t)$, $q_0 = (1 - \varepsilon) q(t)$. Обозначим также Q_0, Q_1 — вероятности отказов Л0, Л1 системы в целом; при этом

$$Q = Q_0 + Q_1, \quad P = 1 - Q.$$

В указанных обозначениях справедлив следующий алгоритм расчета. Функции Q_0, Q_1 определяются независимо друг от друга, каждая по своей СФН или ССН; при этом можно использовать все рассмотренные выше методы расчета системы. В результате получаем:

$$Q_1 = Q_1(q_{11}, \dots, q_{1n}); \quad Q_0 = Q_0(q_{01}, \dots, q_{0n}),$$

где $q_{0i} = q_{0i}(t)$; $q_{1i} = q_{1i}(t)$ — вероятности отказов Л0, Л1 i -го элемента системы. Затем определяется функция ненадежности системы в целом $Q(t) = Q_0(t) + Q_1(t)$, которая позволяет определить любые другие ее показатели надежности (см. § 10.2). В качестве примера на рис. 10.4 приведена простейшая схема резервирования из четырех переключающих элементов (а) и ее ССН для отказов Л0 (б) и Л1 (в). Для данного примера получаем:

$$Q_0 = [1 - (1 - q_{01})(1 - q_{02})][1 - (1 - q_{03})(1 - q_{04})] = [1 - (1 - q_0)^2]^2 = 4 q_0^2;$$

$$Q_1 = 1 - (1 - q_{11} q_{12})(1 - q_{13} q_{14}) = 1 - (1 - q_1^2)^2 \approx 2 q_1^2.$$

Вторые равенства соответствуют однотипным элементам, приближенные — $q_0 \ll 1$, $q_1 \ll 1$. Схема подавляет отказы Л1 примерно в два раза интенсивнее отказов Л0. Если добавить пятый элемент (показано на рис. 10.4 штриховой ли-

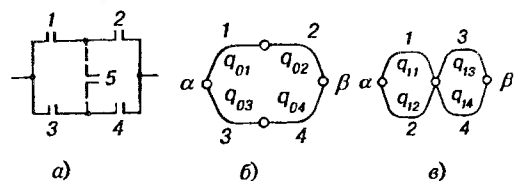


Рис. 10.4

нией), то реализуется мостиковая схема (см. табл. 10.5), которая подвывает оба типа отказов в одинаковой степени: $Q_0 \approx 2 q_0^2$, $Q_1 \approx 2 q_1^2$. Примеры результатов расчета надежности двоичных логических устройств с учетом двух типов отказов приведены в § 10.4.

Целесообразность раздельного расчета надежности по отношению к отказам Л0 и Л1 диктуется не только самой методикой расчета, но также и тем обстоятельством, что последствия указанных типов отказов могут быть существенно различными (например, последствия ложного срабатывания и ложного несрабатывания системы аварийной защиты).

В заключение отметим следующее. При анализе практически любых сколь-нибудь сложных систем широко применяются методы декомпозиции (диакоптики); сказанное в полной мере справедливо и для рассматриваемых задач. Подавляющее большинство практически встречающихся систем расчета надежности можно разбить на независимые подсистемы в общем случае и, как правило, различных типов. Применение к этим подсистемам наиболее адекватных им методов расчета (как приведенных выше, так и рассмотренных в последующих разделах) позволяет кардинально уменьшить трудоемкость расчета надежности сложных систем.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ

Широкий класс систем с зависимыми отказами элементов, в том числе широкий класс систем с резервированием как невозстанавливаемых, так и с восстановлением, может эффективно отображаться марковской моделью, в частности марковской системой с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Для этого достаточно, чтобы все элементы системы характеризовались экспоненциальными распределениями времени наработки до отказа и времени восстановления (когда средние значения времени восстановления элементов достаточно малы по сравнению со средними значениями времени их «жизни», то вид аппроксимации функций распределения времени восстановления элементов практически несущественен с точки зрения оценки основных показателей надежности системы; необходимо лишь сохранение правильных значений среднего времени восстановления).

Графическим отображением марковской системы с дискретным множеством состояний и непрерывным временем может служить ее так называемый граф состояний, множество узлов которого служит отображением всех возможных состояний системы, а множество ветвей — отображением интенсивностей всех возможных переходов между состояниями, причем направления переходов указываются стрелками — см. рис. 10.5, где $\mathbf{C} = \|0, 1, \dots, n\|^T$ — вектор состояний системы; $\Lambda = \|\Lambda_{ik}\|_{n,n}$ — матрица интенсивностей переходов; $N = n + 1$ — общее число состояний системы; $\pi(t) = \|\pi_0(t), \pi_1(t), \dots, \pi_n(t)\|^T$ — вектор вероят-

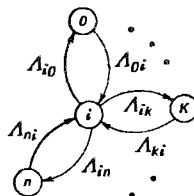


Рис. 10.5

ностей состояния системы $\pi_i(t)$ — вероятность пребывания системы в i -м состоянии в момент времени t . Отметим, что, поскольку события, отображаемые вероятностями $\pi_i(t)$, образуют пол-

ную группу, то $\sum_{i=0}^n \pi_i(t) = 1$ — условие нормировки.

Вектор $\pi(t)$ необходим и достаточен, чтобы определить любые показатели надежности системы; следовательно, исходная задача анализа рассматриваемой системы сводится к определению вектора $\pi(t)$ при заданных матрице Λ и векторе начальных условий $\pi(0) = \pi_0 = \|\pi_{00}, \pi_{10}, \dots, \pi_{n0}\|^T$.

Указанная задача решается с помощью уравнения Колмогорова

$$d\pi(t)/dt = \alpha\pi(t)$$

при заданных начальных условиях $\pi(0) = \pi_0$, где

$$\alpha = \|\alpha_{ik}\|_{n,n}; \quad \alpha_{ik} = \begin{cases} -\sum_{l=0}^n \Lambda_{il}, & i = k, \\ \Lambda_{ki}, & i \neq k, \end{cases}$$

— матрица Колмогорова.

Учитывая условие нормировки, можно записать укороченное уравнение Колмогорова

$$d\pi(t)/dt = a\pi(t) + b,$$

где

$$a = \|\alpha_{ik}\|_{n,n}; \quad a_{ik} = \begin{cases} -\Lambda_{0i} - \sum_{l=0}^n \Lambda_{il}, & i = k, \\ -\Lambda_{0i} + \Lambda_{ki}, & i \neq k, \end{cases}$$

— укороченная матрица Колмогорова.

Вектор финальных вероятностей, характеризующий стационарный режим системы $\pi_\infty = \|\pi_{1,\infty}, \dots, \pi_{n,\infty}\|^T$, $\pi_{i,\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \pi_i(t)$,

определяется стационарным укороченным уравнением Колмогорова,

$$a\pi_\infty = -b, \quad b = \|\Lambda_{01}, \Lambda_{02}, \dots, \Lambda_{0n}\|^T.$$

Уравнение Колмогорова — система дифференциальных обыкновенных линейных уравнений, записанная в форме уравнения состояния; численное решение подобной системы, а также системы уравнений стационарного режима реализуется современным стандартным математическим обеспечением ЭВМ. Однако во многих практических задачах целесообразно использовать точные или

приближенные (в том числе машинно-реализуемые) решения в символьной форме, основанные, в частности, на преобразовании Лапласа в изображении уравнения Колмогорова в силу известных достоинств символьного решения.

Преобразование Лапласа укороченного уравнения Колмогорова можно записать в следующей форме:

$$A(S)\tilde{\pi}(S)=S^{-1}R(S), \quad \tilde{\pi}(S)=\|\tilde{\pi}_1(S), \dots, \tilde{\pi}_n(S)\|^T,$$

где

$$A(S)=\|A_{ik}(S)\|_{n,n}; \quad A_{ik}(S)=\begin{cases} S+\Lambda_{0i}+\sum_{l=0}^n \Lambda_{il}, & i=k, \\ -\Lambda_{ki}+\Lambda_{0i}, & i \neq k; \end{cases}$$

$$R(S)=\|r_1(S), \dots, r_n(S)\|^T; \quad R_i(S)=\Lambda_{0i}+S\pi_i 0;$$

$$\tilde{\pi}_i(S)=L[\pi_i(t)]=\int_0^{\infty} \exp(-St) \pi_i(t) dt$$

— преобразование Лапласа вероятности $\pi_i(t)$.

Матричная форма решения уравнения:

$$\tilde{\pi}(S)=S^{-1}A^{-1}(S)R(S).$$

В скалярной форме уравнение будет иметь вид

$$\tilde{\pi}_k(S)=S^{-1}B_k(S)/D(S); \quad k=\overline{1,n}$$

где

$$D(S)=\det A(S)=\sum_{v=0}^{\delta} d_v S^v, \quad \delta=n$$

— характеристический полином;

$$B_k(S)=\det A_k(S)=\sum_{\mu=0}^{\beta_k} b_{\mu} S^{\mu}, \quad \beta_k \leq n.$$

где $A_k(S)$ — матрица, получаемая из $A(S)$ путем замены ее k -го столбца столбцом $R(S)$,

В дальнейшем, когда это не будет приводить к неясности, индекс « k » в последних выражениях будем опускать, записывая преобразование Лапласа — изображение вероятности пребывания системы в некотором состоянии в момент времени t в следующем виде:

$$\tilde{\pi}(S)=S^{-1}B(S)/D(S);$$

$$B(S)=\sum_{\mu=0}^{\beta} b_{\mu} S^{\mu}; \quad D(S)=\sum_{v=0}^{\delta} d_v S^v; \quad \beta \leq \delta = n.$$

Одной из наиболее информативных характеристик надежности системы (и вместе с тем наиболее трудоемкой для расчета) является функция распределения наработки до отказа T -времени первого попадания системы из любого начального состояния в ее поглощающее состояние — функция ненадежности системы $Q(t)$ (данная функция может определяться как для реально поглощающей, так и для квазипоглощающей систем).

Если какая-либо $\pi(t)$ — вероятность пребывания системы в поглощающем узле, то

$$\tilde{Q}(S)=\tilde{\pi}(S)=S^{-1}\tilde{\varphi}(S),$$

где

$$\varphi(S)=L[\varphi(t)]=B(S)/D(S)$$

— преобразование Лапласа плотности распределения T . Функция $\tilde{\varphi}(S)$ обладает следующими свойствами:

$$\lim_{S \rightarrow \infty} \tilde{\varphi}(S)=0, \quad \lim_{S \rightarrow 0} \tilde{\varphi}(S)=1,$$

откуда следует $\alpha = \delta - \beta \geq 1, \quad d_0 = b_0$.

Ниже приводятся несколько приближенных символьных методов оценки функции $Q(t)$ на основании преобразования Лапласа (минуя непосредственное обратное преобразование), справедливых для любого числа состояний системы.

Приближенная оценка вероятности пребывания системы в заданном состоянии в момент времени t представлена отрезком ряда Маклорена путем разложения ее преобразования Лапласа в ряд Лорана. Разлагая $\varphi(S)$ в ряд Лорана и переходя почленно к оригиналу (поскольку ряд сходящийся), получаем следующее выражение для функции ненадежности, являющееся ее рядом Маклорена:

$$Q(t)=\sum_{i=\alpha}^{\infty} \frac{l_i}{i!} t^i,$$

где коэффициенты ряда Лорана l_i определяются следующими рекуррентными соотношениями:

$$l_{\alpha}=d_{\delta}^{-1} b_{\beta};$$

$$l_{\alpha+1}=d_{\delta}^{-1} (b_{\beta-1}-l_{\alpha} d_{\delta-1});$$

$$\dots \dots \dots$$

$$l_{\alpha+k}=d_{\delta}^{-1} (b_{\beta-k}-\sum_{i=\alpha}^{\alpha+k-1} l_i d_{\delta-\alpha-k+i}).$$

Для оценки малых вероятностей (т.е. при анализе высоконадежных систем) достаточно ограничиться r -членным отрезком ряда

$$Q_r(t)=\sum_{i=\alpha}^{\alpha+r-1} \frac{l_i}{i!} t^i,$$

где обычно $r \leq 2 \div 3$ независимо от N .

Пример. Пусть преобразование Лапласа функции ненадежности $\tilde{Q}(S)=S^{-1}(6+S)/(6+11S+6S^2+S^3)$, следовательно, $d_0=b_0=6$, $d_1=11$, $d_2=6$, $b_1=d_1=1$, $\delta=3$, $\beta=1$, $\alpha=2$.

При этом получаем следующие коэффициенты ряда Лорана: $l_1=0$; $l_2=1$; $l_3=0$; $l_4=-11$; $l_5=60$.

В результате при $r=4$ уравнение имеет вид:

$$Q_r(t)=0,5 t^2 - 0,46 t^4 + 0,5 t^5.$$

Его точным решением будет: $Q(t)=1-2,5 \exp(-t)+2 \exp(-2t)-0,5 \exp(-3t)$.

Сравнение точного и приближенных решений приведено на рис. 10.6; при $Q < 0,1$ ошибка одночленного отрезка ряда составляет примерно 15%, двух- и трехчленного — 1,5%, четырехчленного — 0,4%; при $Q < 0,01$ ошибка одночленного ряда составляет примерно 1%. Поскольку требуемая точность оценки вероятности отказа обычно не

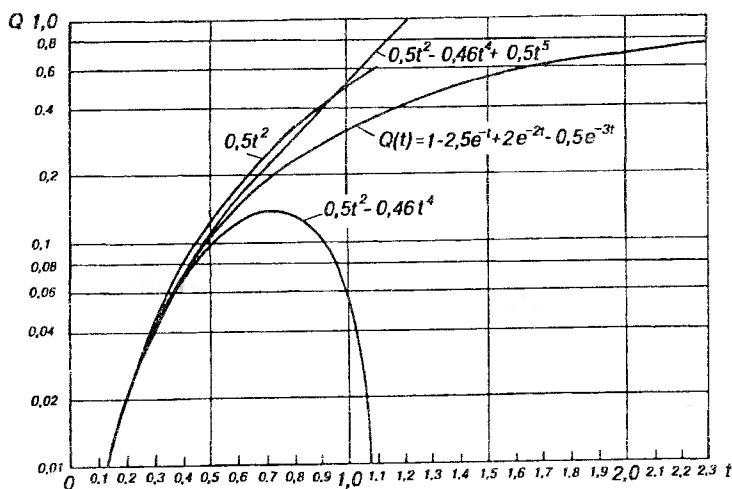


Рис. 10.6

превышает 20 % (хотя бы из-за низкой точности исходных данных), то в данном случае достаточна оценка $Q(t) \approx 0,5 t^2$. Таким образом, рассмотренная методика может быть весьма эффективной при оценке малых вероятностей отказа, т. е. при анализе высоконадежных систем независимо от их сложности.

Метод моментов. Функция распределения наработки до отказа (функция ненадежности), как и любая функция распределения, может с любой конечной точностью отображаться конечным числом ее моментов. В рассматриваемом случае необходимое число моментов обычно не превышает четырех.

Начальный момент случайной величины T k -го порядка можно определить непосредственно по преобразованию Лапласа плотности распределения $\varphi(s)$, минуя обратное преобразование Лапласа на основании следующего соотношения:

$$\alpha_k = \int_0^{\infty} t^k \varphi(t) dt = (-1)^k \lim_{s \rightarrow 0} d^k \tilde{\varphi}(s) / ds^k.$$

В результате имеют место следующие выражения для первых четырех начальных моментов:

$$\alpha_1 = \tau = \delta_1 - \beta_1;$$

$$\alpha_2 = 2(\delta_1^2 - \delta_1 \beta_1 - \delta_2 - \beta_2);$$

$$\alpha_3 = 6[\delta_3 - \beta_3 + \beta_1 \delta_2 - \delta_1 \beta_2 + 2\delta_1 \delta_2 + \delta_1^3(\delta_1 - \beta_2)];$$

$$\alpha_4 = 24 \{ \beta_4 - \delta_4 - \delta_1(\beta_3 - \delta_3) + \delta_2(\beta_2 - \delta_2) + \delta_1[\delta_1(\beta_2 - \delta_2) + 2\delta_2(\beta_1 - \delta_1)] - \delta_1^3(\beta_1 - \delta_1) \},$$

где $\beta_i = b_i / d_0$, $\delta_i = d_i / d_0$.

Далее определяются соответствующие центральные моменты:

$$\mu_1 = 0;$$

$$\mu_2 = \sigma^2 = \alpha_2 - \alpha_1^2 = \alpha_2 - \tau^2;$$

$$\mu_3 = \alpha_3 - 3\alpha_2\alpha_1 + 2\alpha_1^3;$$

$$\mu_4 = \alpha_4 - 4\alpha_3\alpha_1 + 6\alpha_2\alpha_1^2 - 3\alpha_1^4.$$

После этого можно определить коэффициенты формы кривой распределения — ее асимметрию $A_s = \mu_3 / \sigma^3$ и эксцесс $E_x = \mu_4 / \sigma^4 - 3$.

Полученные данные позволяют подобрать, как правило, достаточно эффективную аппроксимацию распределения наработки системы до отказа, используя, в частности, методику, изложенную в [10.6]: вначале по асимметрии и эксцессу определяется тип функции искомой аппроксимации, после чего определяются параметры выбранной функции.

Аппроксимация функции ненадежности задержанной экспонентой. В ряде случаев характер функции $Q(t)$ позволяет достаточно эффективно использовать следующую ее аппроксимацию:

$$Q_a(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_3; \\ 1 - \exp[-(t - \tau_3) / \sigma_a], & t \geq \tau_3, \end{cases}$$

что качественно иллюстрируется на рис. 10.7.

Данный метод достаточно эффективен, когда корни характеристического уравнения $D(S) = 0$, пронумерованные в порядке их возрастания, удовлетворяют условию $s_1^{-2} \gg \sum_{i=2}^n s_i^{-2}$. Иначе говоря,

функция $Q(t)$ содержит одну доминирующую — медленно затухающую экспоненту (по сравнению с остальными практически неограниченным множеством быстро затухающих экспонент, формирующих квазизадержку). Можно показать, что сказанное имеет место, когда коэффициенты характеристиче-

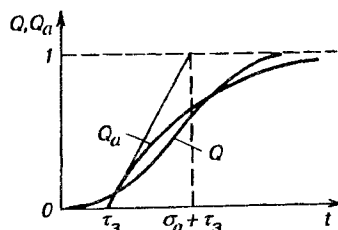


Рис. 10.7

ского полинома $D(s)$ удовлетворяют условию $d_1^2 \gg 4 d_0 d_2$.

При этом постоянная времени доминирующей экспоненты оценивается соотношением $\tau_1 = s_1^{-1} = d_1 / d_0$.

Выбор коэффициентов аппроксимации σ_a , τ_a осуществляется, исходя из равенства первых двух моментов (первого начального τ и второго центрального σ) функций $Q(t)$ и $Q_a(t)$. При этом получаем:

$$\sigma_a = \sigma = ((\delta_1^2 - \beta_1^2) - 2(\delta_2 - \beta_2))^{0.5};$$

$$\tau_a = \tau - \sigma = \tau_a - \sigma_a = \delta_1 - \beta_1 - \sigma.$$

Наиболее полные результаты расчета типовых систем с резервированием и восстановлением на основе марковской модели приведены в [10.7].

В ряде случаев для расчета систем с неэкспоненциальными законами распределения наработки до отказа и времени восстановления можно построить эквивалентную марковскую модель на основе метода фиктивных состояний и дополнительных переменных [10.11], где рассмотрены также методы расчета некоторых модификаций марковских систем.

Практически все ограничения на характер законов распределения элементов снимаются при расчете методом статистического моделирования на ЭВМ (метод Монте-Карло—ММК), что достигается однако ценой часто непреодолимого увеличения объема вычислений. Существенно более эффективные алгоритмы реализуются путем рационального сочетания ММК с численно-аналитическими методами и диакопстикой [10.7, 10.8].

10.4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Резервирование — метод повышения надежности объекта за счет избыточности. Под избыточностью понимают применение дополнительных средств и (или) возможностей в целях сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Резервирование позволяет обеспечить сколько угодно высокую надежность системы (если не учитывать затраты) при некоторой ограниченной (принципиально сколько угодно низкой) надежности элементов, входящих в эту систему.

Резерв — совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования.

Основной элемент — элемент структуры объекта, необходимый для выполнения объектом требуемых функций при отсутствии отказов его элементов.

Резервный элемент — элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента при отказе последнего.

Резервируемый элемент — основной элемент, при отказе которого в объекте предусмотрен резервный элемент.

Структурное резервирование — резервирование за счет избыточных элементов структуры объекта.

Временное резервирование — резервирование за счет избыточного времени решения объектом его задачи.

Информационное резервирование — резервирование за счет избыточной информации.

Нагруженный резерв — когда режим работы резервных элементов практически совпадает с точки зрения надежности с режимом работы основных элементов, так что можно полагать интенсивности отказов основных и резервных элементов равными.

Облегченный резерв — когда режим работы резервных элементов (с точки зрения их надежности) заметно облегчен по сравнению с основными, так что можно полагать интенсивности отказов резервных элементов заметно меньше основных.

Ненагруженный резерв — режим работы резервных элементов, когда их интенсивности отказов настолько малы (по сравнению с интенсивностью отказов основных элементов), что ими можно пренебречь.

Общее резервирование — когда объект резервируется в целом (как целое).

Раздельное резервирование — когда резервируются отдельные элементы объекта (позлементное резервирование) или их группы.

Смешанное резервирование — сочетание общего и раздельного резервирования.

Постоянное резервирование — когда отказ элементов объекта не приводит к перестройке его структуры.

Динамическое резервирование — когда отказ элементов объекта сопровождается перестройкой его структуры.

Резервирование замещением — динамическое резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

Скользкое резервирование — частный случай резервирования замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами так, что каждый из них может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

Кратность резервирования: $K = R / M$, где R — количество резервных элементов, M — количество основных элементов. **Дублирование** — резервирование при $K = 1$.

ПРИМЕРЫ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Общее резервирование при нагруженном резерве. ССН приведена на рис. 10.8, откуда следует

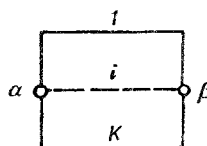


Рис. 10. 8

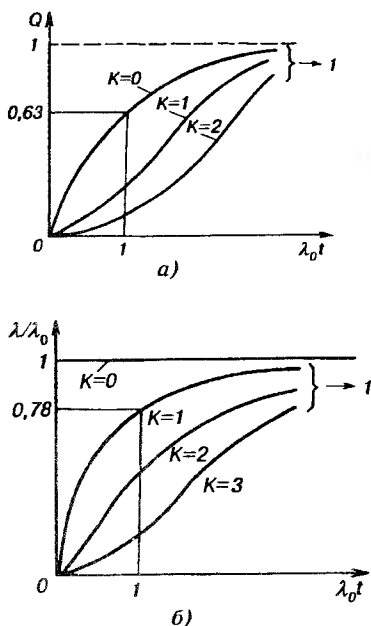


Рис. 10.9

$$Q = Q_p = \prod_{i=0}^K Q_i = Q_0^{K+1}.$$

Пусть $Q_0(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}$, при этом $Q = (1 - e^{-\lambda_0 t})^{K+1}$;

$$\lambda(t) = Q'(t) / (1 - Q(t)) = \frac{(K+1)\lambda_0 e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^K}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{K+1}};$$

$$\tau = \int_0^{\infty} (1 - Q(t)) dt = \lambda_0^{-1} \sum_{i=0}^K (1+i)^{-1};$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t-\tau)^2 Q'(t) dt = \lambda_0^{-2} \sum_{i=0}^K (1+i)^{-2}.$$

Соответствующие графики (качественные) приведены на рис. 10.9, а, б: выигрыш надежности может быть достаточно большим, лишь когда t мало по сравнению с $\tau_0 = \lambda_0^{-1}$.

Сравнение общего и раздельного резервирования при нагруженном резерве. Рассматривается система, содержащая N равнонадежных элементов в последовательном соединении; q_0 — вероятность отказа одного (любого) элемента; K — кратность резервирования. Система допускает как общее, так и раздельное (поэлементное) резервирование; соответствующие ССН приведены на рис. 10.10 (а — общее, б — раздельное). Для упрощения принимаем $q_0 N \ll 1$.

В результате получаем:
для общего резервирования

$$Q_{\text{общ}} = [1 - (1 - q_0)^N]^{K+1} \approx (q_0 N)^{K+1};$$

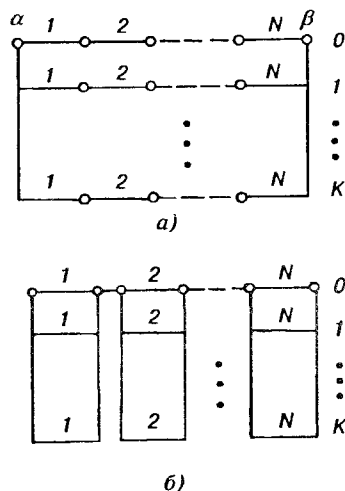


Рис. 10.10

для раздельного резервирования

$$Q_{\text{раз}} = (1 - (1 - q_0^{K+1})^N) \approx q_0^{K+1} N.$$

Выигрыш надежности при переходе от общего резервирования к раздельному $Q_{\text{общ}} / Q_{\text{раз}} = N^K$.

Хотя данный результат получен для предельно идеализированной модели (дает верхнюю оценку выигрыша надежности), он является качественно верным и для широкого класса реальных систем. Чем «глубже» резервирование (т.е. чем более структурно «мелкие» элементы охватываются резервированием или иначе, чем больше узлов резервирования в системе), тем оно эффективнее: при одинаковых затратах резервного оборудования получается больший выигрыш надежности или при одинаковой надежности требуется меньше резервного оборудования. Таким образом, при прочих равных условиях следует стремиться к увеличению «глубины» резервирования.

Следует отметить, что при резервировании элементов и компонентов внутри интегральной микросхемы (или микросборки) выигрыш надежности может быть существенно более низким, чем это вытекает из рассмотренной модели, поскольку отказы здесь являются зависимыми (например, разгерметизация корпуса микросхемы (микросборки) приводит к отказу всех ее элементов).

Необходимо отметить, что во многих случаях практической реализации резервирования требуется, чтобы часть или все узлы резервирования снабжались дополнительной аппаратурой, выявляющей отказ, а иногда и автоматически его устраняющей (например, путем соответствующего переключения элементов внутри узла резервирования — динамическое резервирование). Совокупность указанной аппаратуры (для одного узла резервирования) будем называть контрольно-переключающим элементом (КПЭ). Сами КПЭ имеют конечную вероятность отказа. При этом возникает задача оптимизации структуры раздельного резервирования.

Оптимизация разбиения системы на узлы резервирования с учетом ненадежности КПЭ. ССН рассматриваемой модели системы приведена на рис. 10.11, где по-прежнему: N — общее число равнонадежных элементов системы, q_0 — вероятность отказа одного (любого) элемента, K — кратность резервирования, n_i — количество элементов, входящих в один узел резервирования (УР), обслуживаемый одним КПЭ ($1 \leq n_i \leq N$; $n_i = 1$ — поэлементное резервирование, $n_i = N$ — общее резервирование), q_K — вероятность отказа КПЭ (отказ КПЭ приводит к отказу узла резервирования). В указанных условиях требуется обеспечить оптимальное разбиение системы на узлы резервирования, обеспечивающее минимальную вероятность отказа системы Q . Для упрощения полагаем $q_0 n_i \ll 1$, $q_K \ll 1$, а также на первом этапе решения будем пренебрегать целочисленностью n_i , полагая $n_i = n = N/M$, где M — число узлов резервирования.

В результате получаем $Q \approx \frac{N}{n} [(n q_0)^{K+1} + q_K]$,

откуда $n_{\text{опт}} \approx (q_K / K)^{(K+1)^{-1}} / q_0$.

На следующем (заключительном) этапе определяется оптимальное разбиение системы на узлы резервирования путем перебора структур в окрестности $n_{\text{опт}}$ (в общем случае нецелочисленного). При этом следует учитывать также дополнительные факторы оптимизации, в частности стремление к унификации структуры.

Биномиальное резервирование. Система содержит A однотипных элементов (каналов); система работоспособна, если в работоспособном состоянии находится не менее M любых каналов; q — вероятность отказа одного любого канала. При этом вероятность отказа системы

$$Q = \sum_{i=M}^A C_A^i q^i (1-q)^{A-i}; \quad C_A^i = \frac{A!}{i!(A-i)!}$$

при $q \ll 1$, $Q \approx C_A^M q^M > Q$.

Мажоритарное резервирование. Функциональная схема приведена на рис. 10.12, а, где $K_1, \dots, K_A$ — однотипные каналы, выполняющие одинаковую функцию; $X_i \in 0,1$, $i = \overline{1, A}$ — выходные сигналы каналов; $Y \in 0,1$ — выходной сигнал мажоритарного элемента — выходной сигнал системы; $Y = 1$, если большинство $X_i = 1$, $Y = 0$, если большинство $X_i = 0$ (возможные реализации мажоритарного элемента на три входа приведены на рис. 10.12, в). Пусть q — вероятность отказа одного любого канала; q_M — вероятность отказа мажоритарного элемента; Q — вероятность отказа системы; $Q_A = Q \mid q_M = 0$ — вероятность отказа системы при идеально надежном мажоритарном элементе.

Используя соотношения для биномиального резервирования, получаем:

$$Q_A = \sum_{i=(A+1)/2}^A C_A^i q^i (1-q)^{A-i};$$

$$Q = 1 - (1 - Q_A)(1 - q_M) \approx Q_A + q_M;$$

$$Q_3 = 3 q^2 - 2 q^3; \quad Q_5 = 10 q^3 - 15 q^4 + 6 q^5.$$

График (качественный) $Q_A(q, A)$ приведен на рис. 10.13, а: мажоритарное резервирование повышает надежность только при $q < 0,5$ (при $q > 0,5$ надежность снижается). При $q = 1 - e^{-\lambda t}$ (λ — интенсивность отказов одного канала) зависимость $Q_A = Q_A(t, A)$ качественно изображена на рис. 10.13, б: резервирование эффективно лишь

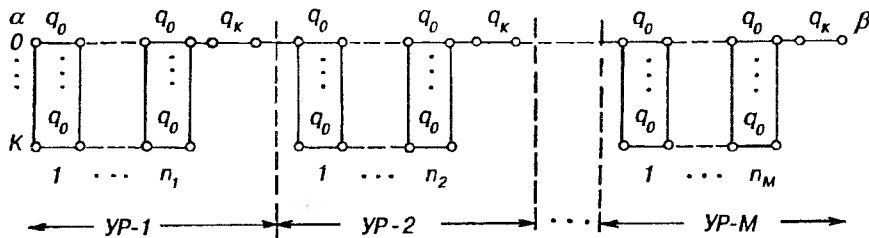


Рис. 10.11

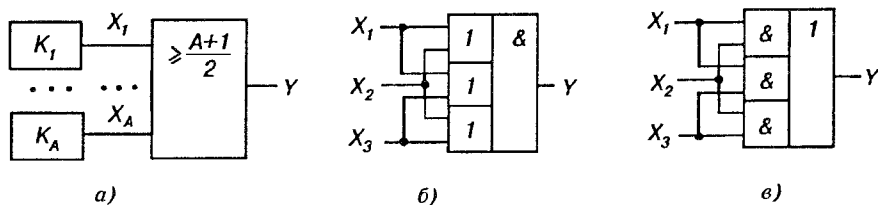


Рис. 10.12

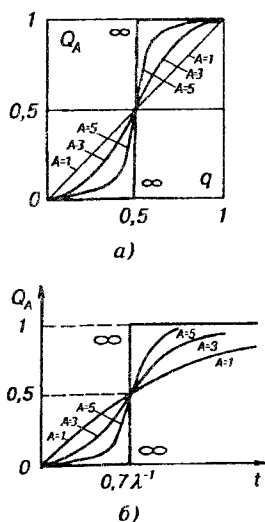


Рис. 10.13

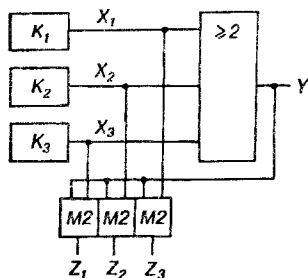


Рис. 10.14

при условии, что время эксплуатации $t_3 < 0,7 \lambda^{-1}$.

Практические достоинства мажоритарного резервирования:

1. Автоматическое подавление (уменьшение вероятности) как постоянных отказов, так и (что особенно существенно) кратковременных сбоев при чрезвычайно простой технической реализации.

2. Простота выявления отказавшего канала. Пример соответствующей схмотехнической реализации для трехканального мажоритарного резервирования приведен на рис. 10.14: если, например,

отказал только первый канал, то $Z_1 = 1, Z_2 = Z_3 = 0$.

Основным недостатком является неполное использование избыточности: система отказывает при отказе двух каналов из трех (канал, оставшийся работоспособным, полезно не используется). Указанный недостаток можно устранить путем некоторого усложнения системы, используя адаптивное мажоритарное резервирование [10.10]. Тем не менее, даже в рассмотренной простейшей реализации мажоритарное резервирование находит весьма широкое применение на практике.

Оптимизация глубины мажоритарного резервирования. Постановка и методика решения данной задачи аналогична таковой для рассмотренной выше задачи оптимизации разбиения системы на узлы резервирования с учетом ненадежности КПЭ (роль КПЭ в данном случае играет мажоритарный элемент). В результате для трехканального мажоритарного резервирования получаем

$$n_{\text{опт}} \approx (q_M / 3)^{0,5} / q; Q(n_{\text{опт}}) = 2 q_M (N / n_{\text{опт}}).$$

Дальнейшее повышение надежности возможно за счет резервирования самих мажоритарных элементов всех узлов резервирования, кроме последнего, как показано на структурной схеме рис. 10.15.

Если при этом общее количество узлов резервирования велико по сравнению с 1, то

$$n_{\text{опт}} \approx q_M / 3; Q(n_{\text{опт}}) = 6 q_M^2 (N / n_{\text{опт}}).$$

Общее резервирование замещением; ненагруженный резерв. Функциональная схема и временная диаграмма, поясняющие принцип работы системы, приведены на рис. 10.16, а, б, где O — основное устройство, находящееся в работе; $1, \dots, i, \dots, K$ — комплект резервного (запасного) оборудования; T_{0i} — наработка до отказа устройства, находящегося в работе после i -го замещения (время отсчитывается от момента замещения; длительность самой операции замещения полагается пренебрежимо малой); $T = \sum_{i=0}^K T_{0i}$ — наработка до

отказа системы в целом.

Далее полагаем, что все устройства однотипны, иначе говоря:

$$Q_i(t) = Q_0(t), \quad i = \overline{0, K}.$$

При этом независимо от закона распределения T_{0i}

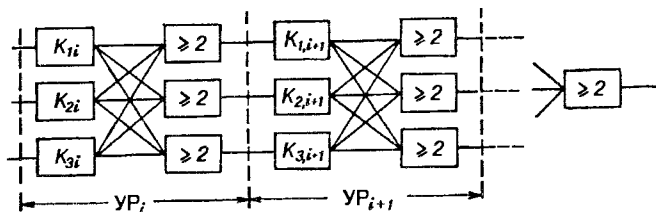


Рис. 10.15

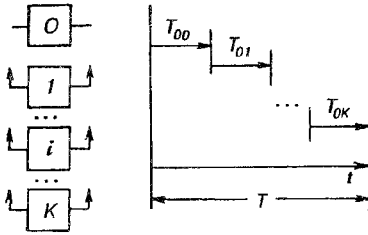


Рис. 10. 16

$$\tau_p = M[T] = (K+1)\tau_0; \quad \sigma_p = \sigma[T] = (K+1)^{0,5} \sigma_0,$$

где

$$\tau_0 = M[T_{0i}]; \quad \sigma_0 = \sigma[T_{0i}], \quad i = \overline{0, K}.$$

Пусть закон распределения T_{0i} нормальный:

$$Q_0(t) = F_0[(t - \tau_0) / \sigma_0].$$

Поскольку сумма нормально распределенных случайных величин также подчиняется нормальному закону, то функция ненадежности резервированной системы:

$$Q_p(t) = F_0((t - \tau_p) / \sigma_p).$$

Пусть закон распределения T_{0i} экспоненциальный:

$$Q_0(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}.$$

Поскольку сумма экспоненциально распределенных случайных величин подчиняется закону Пуассона, то функция ненадежности резервированной системы

$$Q_p(t) = e^{-a} \sum_{i=K+1}^{\infty} \frac{a^i}{i!} = 1 - e^{-a} \sum_{i=0}^K \frac{a^i}{i!}, \quad a = \lambda_0 t.$$

При $a \ll 1$: $Q_p(t) \approx a^{K+1} / (K+1)!$.

Для поэтапного ненагруженного резервирования замещением (основная система содержит N последовательно соединенных однотипных элементов с интенсивностью отказов λ_3 ; комплект резервного (запасного) оборудования содержит K элементов того же типа) функция ненадежности резервированной системы будет иметь вид:

$$Q_p = e^{-a} \sum_{i=K+1}^{\infty} \frac{a^i}{i!}, \quad a = N \lambda_3 t.$$

Резервирование замещением; облегченный резерв. Полагаем, что закон распределения всех элементов системы (находящихся как в работе, так и в составе резервного (запасного) комплекта), экспоненциальный. При этом система Марковская, граф состояний которой приведен на рис. 10.17, где

$$\Lambda_i = \lambda_0 + (K-i)\lambda_1, \quad i = \overline{0, K-1};$$

λ_0 — интенсивность отказов элементов, находящихся в рабочем состоянии; λ_1 — то же для резервных (запасных) элементов ($\lambda_1 < \lambda_0$, $K > 1$, K — кратность резервирования).

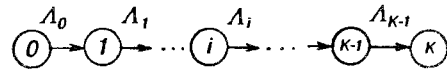


Рис. 10. 17

В этом случае выражение, для преобразования Лапласа функции ненадежности будет иметь вид:

$$\bar{Q}(S) = \frac{1}{S} \prod_{i=0}^K \frac{\lambda_0 + (K-i)\lambda_1}{S + \lambda_0 + (K-i)\lambda_1}.$$

Переходя к оригиналу, получаем функцию ненадежности системы

$$Q(t) = L^{-1}(Q(S)) = 1 - e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^K \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right],$$

где

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} [j + (\lambda_0 / \lambda_1)].$$

Средняя наработка до отказа

$$\tau = \sum_{i=0}^K (\lambda_0 + (K-i)\lambda_1)^{-1}.$$

Резервирование двоичных логических устройств с учетом двух видов отказов. Функциональная схема резервирования приведена на рис. 10.18, где $K_1, K_2, \dots, K_L$ — однотипные (с функциональной и надежностной точек зрения) устройства — каналы, выходные сигналы которых $X_1, X_2, \dots, X_L$ — двоичные переменные; L — общее количество каналов; ВО — восстанавливающий орган; X_B — выходной (двоичный) сигнал ВО.

Функция ВО $X_B = f_B(X_1, X_2, \dots, X_L)$ — булева функция, удовлетворяющая следующим свойствам (вытекающим из назначения ВО и равноправности каналов): $f_B(0, 0, \dots, 0) = 0$, $f_B(1, 1, \dots, 1) = 1$, симметрии, монотонности. Функция f_B , удовлетворяющая перечисленным свойствам, называется восстанавливающей функцией.

Определим показатели надежности рассматриваемой системы, введя следующие обозначения: q_0, q_1 — вероятности отказа ЛО, Л1 одного любого канала; q_{B0}, q_{B1} — вероятности отказа ЛО, Л1 восстанавливающего органа; Q_{B0}, Q_{B1} — вероятности отказа ЛО, Л1 системы в целом; Q_B — результирующая вероятность отказа системы в

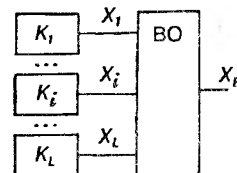
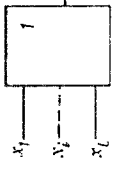
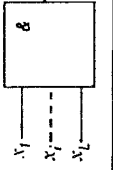
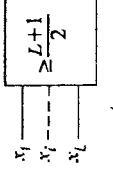
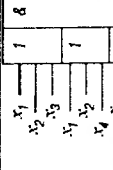
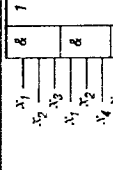


Рис. 10. 18

Т а б л и ц а 10.6

Схемы ВО	Q_0	$\approx Q_0$	Q_1	$\approx Q_1$	Примечания
	q_0^L	—	$1 - (1 - q_1)^L$	$L q_1$	«Поддаются» отказы Л0 и «усиливаются» отказы Л1
	$1 - (1 - q_0)^L$	$L q_0$	q_1^L	—	«Поддаются» отказы Л1 и «усиливаются» отказы Л0
 $x_B = \Gamma \left(\sum_{i=1}^L x_i - 0,5(L+1) \right)$ $\Gamma(Z) = \begin{cases} 1, & Z \geq 0 \\ 0, & Z < 0 \end{cases}$	$\sum_{i=0,5(L+1)}^L C_L^i q_0^i (1 - q_0)^{L-i}$ $L = 3: 3 q_0^2 - 2 q_0^3$ $L = 5: 10 q_0^3 - 15 q_0^4 + 6 q_0^5$	$C_L^{0,5(L+1)} q_0^{0,5(L+1)}$ $3 q_0^2$ $10 q_0^3$	$\sum_{i=0,5(L+1)}^L C_L^i q_1^i (1 - q_1)^{L-i}$ $L = 3: 3 q_1^2 - 2 q_1^3$ $L = 5: 10 q_1^3 - 15 q_1^4 + 6 q_1^5$	$C_L^{0,5(L+1)} q_1^{0,5(L+1)}$ $3 q_1^2$ $10 q_1^3$	Отказы Л0 и Л1 подавляются в равной степени (L — нечетное число)
	$\sum_{i=3}^4 C_4^i q_0^i (1 - q_0)^{4-i} = 4 q_0^3 - 3 q_0^4$	$4 q_0^3$	$\sum_{i=2}^4 C_4^i q_1^i (1 - q_1)^{4-i} = 6 q_1^2 - 8 q_1^3 + 3 q_1^4$	$6 q_1^2$	«Поддаются» как отказы Л0, так и Л1, но первые интенсивнее примерно в $1,5 \times q_1 / q_0^2$ раз
	$\sum_{i=2}^4 C_4^i q_0^i (1 - q_0)^{4-i} = 6 q_0^2 - 8 q_0^3 + 3 q_0^4$	$6 q_0^2$	$\sum_{i=3}^4 C_4^i q_1^i (1 - q_1)^{4-i} = 4 q_1^3 - 3 q_1^4$	$4 q_1^3$	«Поддаются» как отказы Л0, так и отказы Л1, но вторые интенсивнее примерно в $1,5 \times q_0 / q_1^2$ раз

целом; $Q_0 = Q_{B0} \mid q_{B0} = 0$, $Q_1 = Q_{B1} \mid q_{B1} = 0$ — вероятности отказа системы Л0, Л1 при идеально надежном ВО. Запишем соотношения

$$Q_B = Q_{B0} + Q_{B1}, \quad Q_{B0} = 1 - (1 - Q_0)(1 - q_{B0}),$$

$$Q_{B1} = 1 - (1 - Q_1)(1 - q_{B1}).$$

Соотношения $Q_0 = Q_0(q_0, f_B)$, $Q_1 = Q_1(q_1, f_B)$ сведены в табл. 10.6, где приближенные выражения соответствуют малым вероятностям отказов. Таким образом, при заданных $q_0(t)$, $q_1(t)$, $q_{B0}(t)$, $q_{B1}(t)$ приведенные соотношения позволяют определить любые показатели надежности рассмотренных систем.

Основные расчетные соотношения для ряда более сложных систем резервирования с восстановлением приведены, например, в [10.9]. Основные методы информационного резервирования излагаются в [10.10, 10.13]. Вопросы эффективности резервирования энергетических систем рассмотрены в [11.14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 10.1. ГОСТ 27. 002-89. Надежность в технике. Термины и определения.
- 10.2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
- 10.3. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности

по экспериментальными данным. РД 50-690-89. М.: Изд-во стандартов, 1990.

10.4. Вопросы математической теории надежности / Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983.

10.5. Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М.: Советское радио, 1968.

10.6. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969.

10.7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968.

10.8. Горский Л. К. Статистические алгоритмы исследования надежности. М.: Наука, 1970.

10.9. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.

10.10. Согомоян Е.С., Слобачков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989.

10.11. Райншке К., Ушаков И.Л. Оценка надежности систем с использованием графов / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1988.

10.12. Рипс Я.А., Савельев Б.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. М.: Энергия, 1974.

10.13. Хетагуров Я.А., Руднев Ю.П. Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. М.: Энергия, 1974.

10.14. Руднев Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. Новосибирск: Наука, 1989.

Раздел 11

ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

СОДЕРЖАНИЕ

11.1. Общие вопросы	217	11.8. Целеустремленные эргатические системы управления	222
11.2. Автоматизированные системы управления эргатической энергосистемой	218	11.9. Концепция целеустремленной системы	223
11.3. Отказы оперативного персонала	219	11.10. Эргономические факторы безопасности и эффективной работы объектов, управляемых оператором	223
11.4. Семиотические и логико-лингвистические модели в управлении	220	11.11. Трансформационная динамика эргономических систем	227
11.5. Фреймное представление объектов или явлений	220	Список литературы	233
11.6. Экспертные системы и системы поддержки принятия решений	221		
11.7. Обучение и тренировка оперативно-го персонала	221		

11.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Эргатическая энергосистема (ЭЭС) — это совокупность объектов, генерирующих, распределяющих и передающих электрическую и тепловую энергию, и обслуживающих их людей, занятых

достижением общей цели и включенных в общую сеть обмена информацией.

Человеко-машинные системы относятся к классу эргатических систем. В дальнейшем рассматриваются эргатические энергосистемы, хотя большинство положений, относящихся к этим сис-

темам, справедливы и для многих других типов человеко-машинных систем.

Надежность электрэнергетических систем (ЭС) в большой степени зависит от решений, принимаемых еще на стадии проектирования, когда определяются резервы, минимизирующие риск возникновения аварийных ситуаций в подаче энергии и сопротивляемость системы различным возмущениям.

Основные требования к ЭС заключаются в том, чтобы она: удовлетворяла в каждый момент времени потребность в количестве электрической и тепловой энергии соответствующего качества; сохраняла свою целостность, т.е., чтобы не было неконтролируемых разделений основных частей ЭС; ограничивала размеры отказа и уменьшала до минимума риск широкого распространения неполадок; быстро восстанавливалась; сохраняла безопасность.

Основной функцией оперативного персонала ЭС является принятие решения. Имеется в виду не логический вывод, из которого неотвратимо вытекает единственное решение, речь не идет о предписаниях, где одни способы действий предпочитают другим. Речь идет об истинном решении, которое в отличие от логического вывода включает элемент творческого индивидуального выбора.

Для надежной работы персонала в указанных условиях он должен действовать целеустремленно. В целеустремленных эргатических системах (ЦЭС) акцент делается на учете зависимости выбираемых оператором (персоналом) целей, способов и средств деятельности от знаний технологов, конструкторов, проектировщиков и программистов, которые воплощены в энергооборудовании, автоматизированных системах управления (АСУ), структурах технических информационных и управляющих средств, в инструкциях, в нормативно-технических документах по эксплуатации энергообъектов. Таким образом, процесс достижения цели, каковой является обеспечение надежности энергообъекта, рассматривается не только в зависимости от динамики состояния оборудования, но и от квалификации и физиологического состояния оператора (персонала), а также от влияния на его деятельность разработчиков энергообъекта и системы управления им.

Основу указанной системы управления объектом энергетики как целеустремленной эргатической системы составляют следующие положения: любой объект энергетики, управляемый с участием эксплуатационного персонала, должен рассматриваться, проектироваться, создаваться, совершенствоваться как эргатическая система «человек (персонал) — машина — среда»; целеустремленность эргатической системы обуславливается активностью людей, как лично участвующих в эксплуатации и управлении оборудованием, так и вложивших свои знания в технологии, конструкции, программы работы оборудования, АСУ, ЭВМ; диалог оператора с ЭВМ должен рассматриваться как опосредованный диалог с разработчиками оборудования и АСУ; категоричность навязывания оператору априорных решений должна быть адекватна их достоверности в конкретных сложившихся

условиях на объекте (здесь с точки зрения проблемы надежности объектов энергетики различаются адекватность фиксированных проектных решений, например конструкции и технологии энергооборудования, и гибких, например программных решений, допускающих их оперативную корректировку в ходе диалога человека с ЭВМ). Комплекс методов, применяемых при изучении и проектировании объекта энергетики, должен быть также адекватен представлению об объекте как о динамической эргатической системе. Поэтому прогнозировать уровень надежности ее работы можно только на основе всестороннего и глубокого изучения поведения конкретной ЦЭС. Для этого необходимо создание достаточного банка данных об экспериментально выявленных закономерностях поведения ЦЭС, что позволит формулировать четкие рекомендации по проектированию ЭЭС для проектных организаций, заводов и монтажных подразделений.

Из этого вытекают также следующие задачи теории эксплуатации:

- исследование влияния конструктивных, технологических, динамических характеристик энергообъектов, а также структуры информационного и программного обеспечения АСУ на надежность процессов их эксплуатации;

- исследование и совершенствование влияния свойств энергообъектов на эффективность эргатической системы;

- оптимизация режимов работы и форм организации труда оперативного персонала и разработка принципов, методов и средств контроля функционального состояния персонала во время дежурства;

- анализ групповой деятельности и взаимодействия операторов разного профиля и уровня;

- правильное распределение функций между человеком и автоматами;

- разработка инженерно-психологических требований для проектировщиков энергообъектов;

- системные методы анализа процессов эксплуатации;

- организация использования энергообъектов при повреждениях и авариях;

- интенсификация процессов обслуживания энергообъектов за счет их механизации и автоматизации.

11.2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Неотъемлемой частью АСУ является оперативный персонал, так как пока еще по разным причинам не удается реализовать в энергетике полностью автоматическую систему управления. На человека-оператора в этих случаях возлагаются координация работы составных частей АСУ, выявление неисправностей и отклонений от нормы, принятие решений с учетом всей создавшейся обстановки и выполнение этих решений.

Построение АСУ технологических процессов должно осуществляться с учетом существенных, необходимых, устойчивых, повторяющихся связей

между всеми компонентами АСУ, включая человека-оператора. При этом необходимо изучать образование, строение, функционирование и развитие АСУ технологических процессов как единого целого, ее связь с другими системами.

Распределение функций между оперативным персоналом и автоматическими устройствами АСУ осуществляется по принципу преимущественных возможностей и по другим, сопутствующим, соображениям. Составляется полное описание всех операций, которые должны выполнять на интересующих режимах работы (и переходах с режима на режим) персонал и автоматы. Сведения об оборудовании энергоблока и персонале представляются обычно по специальной форме [11.1].

11.3. ОТКАЗЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА

Проблема надежности энергетических объектов давно вышла за чисто отраслевые рамки. Аварии и отказы на электростанциях и в энергосистемах сказываются в промышленности и на транспорте, усиливают вредное воздействие на окружающую среду. Более того, до тех пор, пока энергетические объекты относятся к «большим системам», характеризующимся множественностью элементов и их связей, иерархичностью построения и неполной познаваемостью количественных характеристик, человек-оператор принципиально необходим для управления энергообъектами [11.2]. Это связано с тем, что только человек, в отличие от любого технического устройства, способен:

использовать глобальный контекст для требуемого уменьшения (исключения) неопределенности, не прибегая при этом к формализации;

отличать существенные признаки от несущественных;

использовать неявные ориентиры;

чувствовать ситуацию [11.3, 11.4].

Согласно [11.4] человек в системе управления объектом делает ее целеустремленной. Для таких систем характерно то, что они могут продуцировать функционально различные результаты в одинаковых либо в различных условиях либо функциональные результаты одного типа структурно различными способами в одинаковых условиях.

Созданию сложной системы предшествует описание ее определяющих свойств. Таковым для ЭЭС является надежность, т.е. сохранение определенных ее характеристик в заданных пределах в течение требуемого периода времени

$$H_c = F_1(H_{\text{обор}}, H_{\text{СУ}}), \quad (11.1)$$

где H_c — надежность системы; $H_{\text{обор}}$ — надежность технического оборудования; $H_{\text{СУ}}$ — надежность системы управления (СУ).

$H_{\text{обор}}$ определяется известными методами и является сложной функцией времени [11.3]. Повышение надежности основного (технологического) оборудования осуществляется известными способами: резервированием, дублированием, мажорированием и т.д.

Надежность системы управления также являет-

ся сложной функцией времени. Она зависит от разнородных факторов и может быть представлена в неявном виде

$$H_{\text{СУ}} = F_2(H_{\text{ср.упр}}, H_{\text{опер.перс}}), \quad (11.2)$$

где $H_{\text{ср.упр}}$ — надежность средств управления; $H_{\text{опер.перс}}$ — надежность оперативного персонала.

Надежность технического компонента системы управления может быть оценена по методикам расчета надежности технических систем или оборудования.

Гораздо сложнее определить надежность оперативного персонала. В инженерной психологии принято оценивать надежность оператора по комплексу его внутренних свойств, обуславливающих способность оператора сохранить на заданном уровне показатели труда и поддерживать требуемые рабочие качества в условиях существенного усложнения деятельности. Такой комплекс внутренних свойств, создающих потенциальную способность организма к надежной работе называют базовой надежностью.

Надежность человека-оператора в общем случае обусловлена:

степенью инженерно-психологического согласования техники с психофизиологическими возможностями оператора для решения возникающих у него задач;

уровнем обученности и тренированности оператора;

психофизиологическими особенностями личности, порогами чувствительности, а также конкретным физиологическим состоянием человека.

Как правило, к аварийной ситуации приводят несколько причин (от 2 до 8). Статистика показывает, что при аварийных ситуациях в подавляющем большинстве случаев какое-то оборудование находилось в ремонте либо на нем проводились какие-то нестандартные операции.

Погрешности, допускаемые оператором при поддержании заданных значений некоторых параметров, являются нормальным явлением, пока они не нарушают нормального функционирования системы. Ошибки оператора всегда являются ненормальным явлением независимо от того, вызывают они серьезные нарушения в работе систем или нет. Отказ оператора в отличие от отказа технического элемента связан как с его физическим и психическим состоянием, так и с интенсивностью его воздействия на управляемую систему [11.5].

Подробный анализ аварий в энергосистемах показывает, что для оперативного персонала характерны два вида отказов:

оператор совершает неверные действия «механического» характера, т.е. путает ключи управления, забывает какой-то из шагов алгоритма и при этом отключает либо включает оборудование;

оператор неверно понимает ситуацию. В этом случае ошибки оператора не носят случайный характер. Его действия были бы вполне уместны при другой ситуации, которая актуализирована в его сознании, т.е. имеет место ошибка мышления.

11.4. СЕМИОТИЧЕСКИЕ И ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В УПРАВЛЕНИИ

В [11.6] показано, что «возможность эффективного управления сложными системами человеком обуславливается тем, что человек оперирует с языком более высокого уровня, чем язык программирования». Модель управляемого объекта для человека формируется как содержательное описание на естественном языке структуры и законов функционирования объекта управления. Модель семиотической системы управления приведена на рис. 11.1. В ней главенствующими являются блоки M и I .

Необходимость применения такого подхода к автоматизации в отличие от традиционных состоит в том, что для управления сложными объектами принципиально необходимо привлечение информации, которая не может быть выражена количественно. Например, может быть использована теория семантических сетей.

Семантическая сеть [11.7] в общем виде определяется как

$$C = (M_1, M_2, \dots, M_k, S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (11.3)$$

где $M_1, \dots, M_k$ — некоторые фиксированные множества; $S_1, \dots, S_n$ — система отношений, определенная на элементах этих множеств.

Семантическая сеть может интерпретироваться сигнальным графом, т.е. совокупностью узлов и соединяющих их ветвей — отношений. Для любых структур сетевого типа обычно вводится понятие «возбуждения» или «активности». Функционирование сети любого вида выражается в передаче

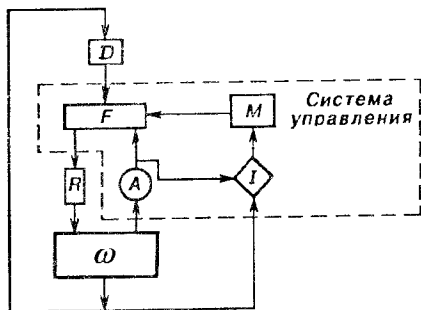


Рис. 11.1. Структура семиотической системы управления:

ω — объект управления (может включать и среду); D — входной преобразователь, через который система управления получает сведения от объекта; R — выходной преобразователь, через который решения, формируемые системой управления, поступают на объект; M — модель знаний об объекте; F — механизм порождения (формирование сигналов управления) в виде совокупности определенных процедур; A — адаптатор, изменяющий некоторые характеристики блока F в соответствии с состоянием объекта; I — интерпретатор наблюдаемых ответных реакций среды и объекта управления на воздействие системы управления в терминах блока M

возбуждения между узлами посредством активизации ветвей.

Этот аппарат хорошо отражает алгоритмические структуры с возможностями альтернативного следствия. Конкретно это выражается в том, что семантическая сеть позволяет определить один из способов решения задачи при известном наборе входных переменных.

11.5. ФРЕЙМОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ИЛИ ЯВЛЕНИЙ

Для описания явлений или некоторого объекта используется групповое описание свойств, называемое фреймовым представлением [11.8]. Фрейм — это то «минимально необходимое», без чего не существует объект, явление или процесс, о котором идет речь. Выделяют два типа фреймов — структурный фрейм, или фрейм минимального описания, и ролевой. Фрейм имеет имя идентификатора описываемого им понятия и состоит из ряда позиций, которые получили название «слоты». С помощью слотов идентифицируются основные структурные элементы понятий. Слоты могут заполняться в процессе активизации фрейма в соответствии с определенными условиями. Это придает модели представления знаний свойства адаптивности. Фреймы являются составляющими элементами фреймовой сети и представляют собой совокупность описаний и в некоторых случаях, связанных с ними процедур, доступ к которым выполняется непосредственно из фрейма. Концепция фреймов предоставляет широкие возможности для построения иерархических структур. Это достигается тем, что один из слотов фрейма отводится для ссылки на иерархически предыдущий фрейм.

Общим недостатком как семантических сетей, так и фреймовых представлений является то, что для них не разработаны эффективные процедуры принятия решений.

Такой процедурой обладают предикатные языки. В системах управления используется, как правило, исчисление предикатов первого порядка.

В языке предикатов первого порядка фигурирует четыре типа базовых элементов: константы (индивидуальные символы), переменные (переменные символы), функциональные символы и предикатные символы. Предикатный язык служит, для описания ситуаций, складывающихся на объекте управления и в среде, в которой этот объект функционирует.

Явным недостатком предикатных языков является меньшая наглядность по сравнению с реляционными представлениями, к которым относятся семантические сети и фреймы. Кроме того, вывод в предикатных языках осуществляется с использованием процедур, опирающихся на дизъюнктивную либо конъюнктивную форму представления. При этом обработка информации и дедуктивный вывод осуществляются путем формальных преобразований, которые не имеют смысловой интерпретации.

11.6. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В последние годы доминирующим направлением в применении вычислительной техники в человеко-машинных системах стали «экспертные системы» [11.9].

Экспертная система — это «воплощение в ЭВМ компоненты опыта эксперта, основанной на знаниях в такой форме, что машина может дать интеллектуальный совет или принять интеллектуальное решение относительно обрабатываемой функции. Желательно дополнительное свойство (которое многие считают главным) — способность системы по требованию объяснять ход своих рассуждений понятным пользователю образом. Обеспечиваются эти свойства в результате программирования, основанного на формальных правилах» [11.9].

Экспертные системы в сущности моделируют поведение эксперта при принятии решения в конкретной предметной области. Исходя из этого необходимым условием является то, что должны быть известны люди, которые справляются с поставленными задачами. Затем их предметная деятельность изучается для определения необходимых знаний. База знаний представляет собой связанные между собой сведения, факты и правила, заранее структурированные и интерпретированные. Характерным для экспертных систем является применение аппарата нечетких множеств [11.10].

За рубежом находит применение ряд экспертных систем для операторов энергетических объектов. Они обеспечивают:

- информацию о текущем состоянии энергоблока;
- анализ сообщений и привлечение внимания оператора к серьезным нарушениям;
- интерактивное проведение диагностики причин нарушений;
- выбор необходимых действий по устранению причин нарушений.

Применение искусственного интеллекта должно позволить решать слабоструктурированные проблемы при использовании АСУ.

В [11.11] отмечается, что искусственный интеллект приводит к существенному расширению теории автоматизации. Особенно важна связь методов искусственного интеллекта с «классическими» моделями автоматизации. Хотя применение эвристических методов в управлении используется повсеместно наряду со строгим описанием, но фактически применение оптимальных эмпирических алгоритмов становится возможным лишь путем внедрения различных диалоговых систем: совещательных, консультационных, совещательно-экспертных, экспертных и систем поддержки оператора.

Совещательная система имеет строго определенную роль: обеспечить логический анализ, обзор прецедентов, т.е. объективности и надежности.

Если исходить из трехступенчатой модели принятия решения человеком в следующей форме:

подготовка решения → решение → реализация решения, то основная помощь может быть оказана именно на первой стадии. Суть этой помощи заключается в том, чтобы переработать значительный поток информации и сформировать новую информацию. Обработка этой информации должна базироваться на знании процесса в форме данных и моделей или в форме правил и (или) уравнений.

Определяющую роль в построении системы играет выбор психологической модели процесса принятия решения. Выделяют дескриптивный, прескриптивный и нормативный подходы к описанию принятия решений.

Дескриптивный подход выражается в точном моделировании конкретного образца деятельности. Он подробно исследован в работах [11.12, 11.13], в которых получен достаточно четкий ответ, что может и чего не может человек, оказавшись в ситуации выбора.

Наиболее используемым оказался прескриптивный подход, предписывающий, как должен поступать человек с нормальным интеллектом, если он намерен обстоятельно и систематизированно обдумывать все аспекты вполне конкретной задачи.

Если условно разделить процесс принятия решений на четыре фазы: постановка задачи, генерация альтернатив, оценка и выбор, реализация решения, то разработка программных средств ограничивается третьей фазой, а по несколько устаревшим данным зарубежные разработки охватывают процесс принятия решения в пределах 2—3 фаз. Модели фаз принятия решения являются важнейшими составляющими любых программных систем принятия решения. Теоретические модели построения семиотических систем принятия решения рассматриваются в [11.14, 11.15].

11.7. ОБУЧЕНИЕ И ТРЕНИРОВКА ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА

В подготовке оперативного персонала выделяются два основных аспекта: методы обучения и тренажа, технические средства обучения и тренажа.

Технические средства обеспечивают реализацию определенного метода обучения, и в этом плане эти два аспекта являются неразделимыми.

Традиционный подход к подготовке оперативного персонала выражается в том, чтобы дать по возможности больше практических знаний и навыков выполнения различных операций на объекте управления, для чего используются так называемые поведенческие тренажеры [11.16]. Тренажеры — имитаторы объекта управления. Функция такого тренажера состоит в том, чтобы полностью повторить требуемое поведение персонала в процессе управления. Для этого тренажер должен содержать точную копию щита управления и модель объекта, обеспечивающую имитацию его поведения в режиме реального времени. Учитывая, что в состав вахты входят несколько операторов, используют комплексные тренажеры, обеспечивающие совместную подготовку операторов энергоблоков в полном объеме их функциональных обязанностей.

Примером такого тренажера является тренажер АЭС Ловиса [11.17]. Этот тренажер предназначен для работы в режиме переподготовки (поддержания уровня натренированности) операторов, работающих на АЭС. Тренажер позволяет реализовать практически любой режим работы энергоблока и его составных частей. Аварийные ситуации и отказы вводятся инструктором на фоне нормального режима без специального предупреждения об этом.

В состав тренажера входят: блочный щит управления, который является копией БЩУ реального энергоблока, блочная ЭВМ АРГУС-500, ЭВМ PDP11-70 и ЭВМ PDP11-34.

Основным требованием к указанным тренажерам является имитация поведения объекта управления в реальном времени, возможность для учебных целей изменения масштаба времени и возврата к некоторому характерному состоянию, а также имитация некоторого набора типичных аварийных ситуаций [11.17]. Основная и главная цель этих тренажеров — дать оперативному персоналу как можно больше опыта работы на объекте управления в различных ситуациях. Фактически это сводится к усвоению набора алгоритмов, для которых обычно существуют инструкции, и необходимо лишь многократно закрепить эти алгоритмы практическим исполнением.

11.8. ЦЕЛЕУСТРЕМЛЕННЫЕ ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривая объект как сложную техническую систему, управление которой осуществляется с обязательным участием человека, можно отнести его к категории эргатических систем, для которых характерны следующие виды человеческой деятельности:

- поддержание техники в рабочем состоянии;
- обучение и организация работы операторов;
- восприятие информации и ее осознание, т. е. обнаружение разладки в контролируемых процессах, определение необходимости вмешательства, разработка альтернатив вмешательства, сравнение альтернатив по эффективности и надежности, выделение конкурирующих альтернатив, принятие решения, реализация решения и корректировка результатов.

Последний тип деятельности персонала, обслуживающего объект, называют оперативной деятельностью. Содержание такой оперативной деятельности можно характеризовать следующими образующими: мотив — цель, переработка текущей информации, диагностирование, планирование, построение концептуальной модели, принятие решения, действия, проверка результатов и корректировка действий.

Высокий уровень дисциплины исполнения не всегда обеспечивает приемлемый результат, ибо оператор может оказаться недееспособным или, что еще хуже, начнет действовать наугад. Другой тип поведения человека-оператора характеризуется

тем, что оператор, решающий эксплуатационную задачу, действует целеустремленно.

Целеустремленное поведение оператора отличается от целенаправленного тем, что у него есть несколько альтернативных способов с разной эффективностью, которыми он может попытаться добиться своего, т. е. оператор имеет выбор. Но там, где существует возможность выбора, необходима оценка нескольких возможных результатов и способов действий с различной эффективностью. Ситуация выбора предъявляет к персоналу куда более разнообразные и сложные требования, чем просто дисциплина исполнения.

По [11.4] суть целеустремленного поведения оператора состоит в том, что он продолжает преследовать одну и ту же цель, изменяя свое поведение при изменении внешних условий. Его состояние определяют четыре компонента: сам оператор, делающий выбор; ситуация (окружение) выбора S ; доступные способы действий C_i и возможные в этой ситуации результаты O_j .

Параметрами целеустремленного состояния являются:

вероятность выбора P_i оператором конкретного способа действия C_i в данной ситуации S . Способы действий — это перечень возможных объективных управляющих воздействий в данной ситуации, объединенных определенной стратегией поведения оператора;

эффективность способа действия E_{ij} — вероятность того, что некоторый способ действия C_i приведет к определенному желаемому результату O_j в конкретной ситуации S ;

удельная ценность V_j результата O_j для конкретного оператора, которая зависит как от объективной ценности результата O_j , так и от мотивов, формируемых внешними требованиями и побуждениями самого оператора.

По-видимому, оператор строит свою модель ситуации выбора (МСВ) на основе убеждений относительно факторов сложности, которые характеризуются обобщенным коэффициентом K_{ip} , а также вышеуказанных компонентов и параметров целеустремленности состояния.

Выражения для взаимосвязи параметров модели ситуации выбора с компонентами модели ситуации выбора можно представить в форме обобщенных показателей:

вероятность выбора

$$P_i = f \left[\{K_{ip}\}, \{C_i\}, \{Q_j\}, V_j, S \right]; \quad (11.4)$$

эффективность

$$E_{ij} = g \left[\{K_{ip}\}, \{C_i\}, \{Q_j\}, S \right]; \quad (11.5)$$

удельная ценность

$$V_j = h \left[\{C_i\}, \{Q_j\}, V_j, S \right], \quad (11.6)$$

где V_j — ценность результатов; функции f , g , h см. ниже; остальные компоненты МСВ объяснены ранее.

Модель ситуации выбора является узкоспециализированным психологическим инструментом решения конкретной оперативной задачи, а не совокупностью всех знаний об объекте; она непол-

т.е. рассогласованием между стратегией оператора и стратегией управления, на которую ориентировались проектировщики техники;

потерей бдительности в монотонных условиях; слепым доверием к надежности автоматов, сообщениям и действиям партнеров, диспетчеров; готовностью переложить ответственность на коллег;

влиянием эмоционального состояния на процесс восприятия информации, вследствие чего наблюдаются явления гиперрефлексии (завышения объема и значимости сигналов), искажающей восприятие фактической информации;

возникновением, передачей, распространением неадекватных состояний у всех членов смены (страх, паника, беззаботность);

подверженностью отрицательному влиянию факторов окружающей среды и т.д.

Наиболее распространенная причина ошибок операторов — неадекватное обеспечение их информацией: сигналов поступает либо слишком мало для постановки точного диагноза нарушения, либо слишком много, и оператор теряется в них, не может сосредоточиться на главном, оказывается перегружен информацией. На рис. 11.3 показаны результаты анализа действия операторов теплового энергоблока при ликвидации аварий. Причем вероятность задержки в обслуживании сигналов, т.е. ненулевого ожидания, $P\{\omega > 0\}$ и среднее время ожидания обслуживания аварийных сигналов высшей приоритетной группы ω_1 и других групп с убывающими приоритетами $\omega_2, \omega_3, \omega_4$ представлены как функции числа одновременно поступив-

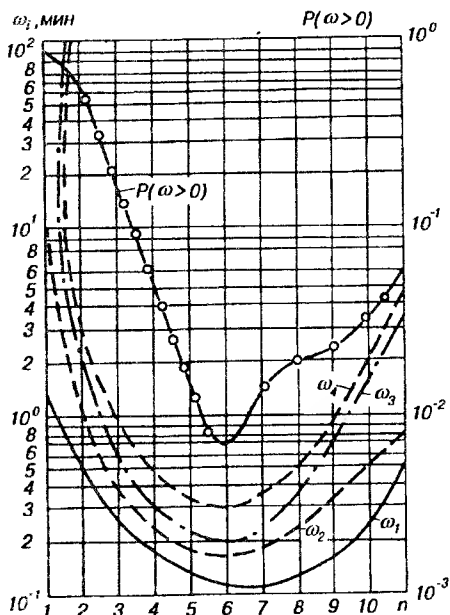


Рис. 11.3. Зависимости вероятности ненулевого ожидания сигналов $P\{\omega > 0\}$ и среднего времени ожидания сигналов разных приоритетных групп при аварии ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$) от числа воспринимаемых оператором приборов n

ших к оператору сигналов n . Данные свидетельствуют о необходимости регулирования, оптимизации интенсивности потока сигналов, поступающих к оператору, с целью адаптации их числа и интенсивности к реальным возможностям конкретного человека.

Разные люди проявляют эмоциональные реакции разной интенсивности при одних и тех же происшествиях. На рис. 11.4 показана кривая реагирования живых систем на сигналы внешней среды.

Фаза Q_1 соответствует начальному торможению, когда человек как бы замирает в ожидании последующего развития наблюдаемого (возможно, и неосознанно) явления, опасаясь отреагировать на случайный одиночный сигнал, который исчезает сам собой. Фаза Q_2 — это фаза активного реагирования, когда человек развивает наибольшую целеустремленную активность и может эффективно воздействовать на среду и машину. Фаза Q_3 соответствует открытому И.П.Павловым запредельному торможению, когда процессы возбуждения сменяются торможением и человек как бы парализуется слишком мощным сигналом, теряя способность целеустремленно, активно реагировать. Он либо выключается из контура управления, либо делает грубые ошибки. Разработчикам систем аварийной сигнализации всегда надо помнить о том, что излишне сильные сигналы иногда вызывают обратную, тормозную реакцию у оператора.

На рис. 11.4 условно показано, что наиболее спокойный, собранный оператор энергоблока (вектор рефлексии R_1) активно, сосредоточенно и

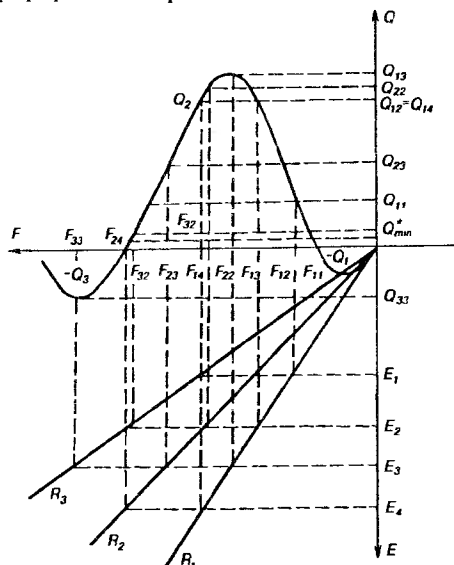


Рис. 11.4. Три фазы реагирования человека на возрастающие сигналы:

Q — интенсивность (эффективность) реагирования; E_i — поток сигналов об отклонениях параметров управляемого объекта; F — субъективное отражение оператором потока сигналов; R_i — векторы рефлексии — субъективного отражения и эмоциональной реакции человека на поток сигналов (R_1 — пониженная реакция, R_2 — нормальная, R_3 — повышенная)

мощно реагирует на все виды отказов: E_1 — нарушения технико-экономических показателей; E_2 — отклонения вспомогательных технологических параметров; E_3 — отклонения важных технологических параметров; E_4 — аварийные нарушения режима. Соответствующие значения эффективности действий оператора Q_{11} , Q_{12} , Q_{13} и Q_{14} достаточно высоки.

Если выполнить соответствующие построения на рис. 11.4 для операторов с более выраженной эмоциональной реакцией (R_2 и R_3), то легко увидеть, что индивид с вектором рефлексии R_3 даже при отклонении вспомогательных параметров E_2 испытывает эмоциональную и информационную перегрузку, вследствие чего эффективность его реакции снижена; индивид с R_2 оказывается в подобном состоянии при отклонениях важных параметров.

Для первого оператора характерна гипорефлексия, т.е. субъективное занижение объема и значимости воспринимаемой информации. Он способен отбирать наиболее важную информацию, игнорируя второстепенную, так что в каждый момент при R_1 объем воспринятой информации меньше, чем отображенной: $F_{li} < E_i$. Напротив, оператор с R_3 увеличивает и опасность ситуации, и объем необходимой информации. Не будучи в состоянии сосредоточиться на наиболее важных сведениях, он оказывается перегружен информацией, теряется и не может принять правильного решения. Для оператора с вектором рефлексии R_3 характерна гиперрефлексия, так что $Q_{32} = Q_{min}$.

Экспериментальные исследования показали, что деятельность оператора может протекать по-разному в зависимости от применяемой им стратегии. На рис. 11.5 показаны характеристические кривые зависимости эффективности восприятия информации Q от числа фиксаций глаз F при разных стратегиях восприятия: S_a — по отдельным элементам (по буквам), S_b — малыми группами

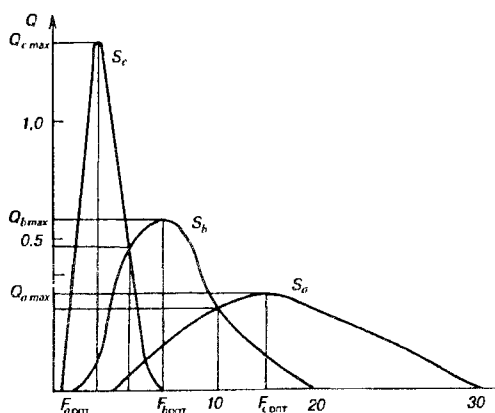


Рис. 11.5. Экспериментальные характеристические кривые трех стратегий восприятия информации S_a , S_b , S_c : Q — эффективность восприятия; F — число оперативных единиц восприятия; S_a — отдельные элементы (буквы); S_b — малые группы (модули, слоги); S_c — большие группы (агрегаты, слова)

(модулями, слогами), S_c — большими группами (агрегатами, словами). В психологии установлено, что, длительная фиксация глаз оператора на щите или дисплее соответствует комплексу сигналов, воспринимаемых человеком как единое целое.

На основе представлений о разных стратегиях деятельности оператора (см. рис. 11.5) и векторах рефлексии, т.е. о закономерностях отражения им информации (см. рис. 11.4), можно построить полную номограмму взаимодействия оператора с объектом (рис. 11.6). В квадранте I отражается динамика плотности информационного потока, поступающего на щит от объекта, или конкретного параметра энергоблока во времени $E(T)$; в квадранте II показаны векторы рефлексии при разных стратегиях деятельности оператора R_{S_a} , R_{S_b} , R_{S_c} ; в квадранте III — характеристические кривые этих стратегий $Q_a(F)$, $Q_b(F)$ и $Q_c(F)$; в квадранте IV

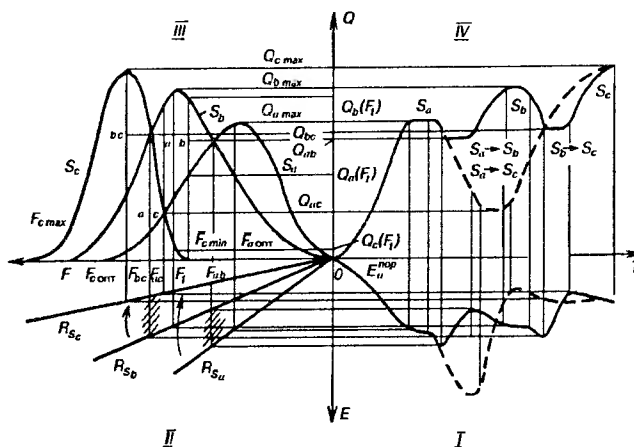


Рис. 11.6. Номограмма для моделирования и расчета динамики взаимодействия оператора с объектом управления при трансформациях стратегий деятельности: E — поток информации от объекта; T — время; R_j — векторы рефлексии; F — субъективное отображение потока информации оператором; Q — активность (эффективность) действий оператора

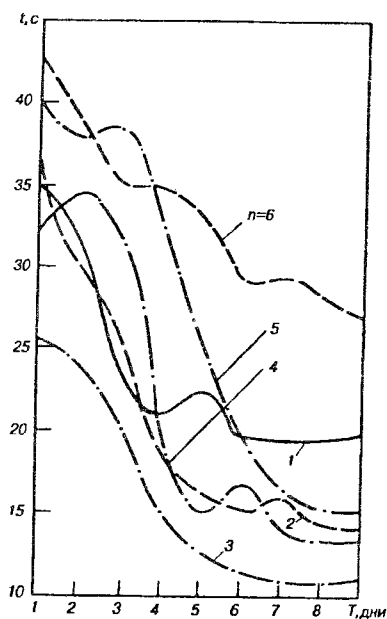


Рис. 11.7. Экспериментальные кривые процесса обучения операторов;
 t — среднее время регулирования параметров; T — время обучения

строится динамика активности (эффективности) оператора $Q(T)$ с учетом $E(T)$, R_S , $Q_i(F)$.

Волнообразный характер изменения $Q(T)$ (рис. 11.6) в процессе обучения подтверждается экспериментально. На рис. 11.7 показаны кривые процессов обучения людей управлению параметрами при разных числах n одновременно воспринимаемых приборов.

При возникновении нарушений режима после долгого, монотонного ожидания оператор должен быстро сменить свое состояние и структуру деятельности, иначе возникнет опасное рассогласование между требуемой и фактической стратегиями его деятельности. Динамика таких трансформационных процессов существенно влияет на надежность систем управления. Ее исследование основано на положениях трансформационной теории обучения, адаптации и динамики систем [11.19]. Надежность и эффективность деятельности человека существенно снижаются на этапах трансформации стратегий деятельности при переходе от нормального к аварийному режиму работы системы.

Опыты, проведенные в условиях реальных аварийных испытаний [11.3], показали, что при возникновении аварий операторам свойственна обычно не активная, хладнокровная норморефлексия, а гиперрефлексия. При этом в число сигналов, которые они учитывают и перерабатывают в ходе ликвидации аварий, они включают наряду с действительно относящимися к аварии многие второстепенные сигналы, случайно возникшие в системе. Оператор, уверенно владеющий и нормальной, и

аварийной стратегиями, но не обученный трансформации нормальной стратегии в аварийную, может запоздать с перестройкой на аварийную стратегию и, вследствие этого не справиться с аварийной задачей.

Обычно причиной пропуска оператором экстренных сигналов считают отвлечение внимания, не видя за этим трудности переключения человека с одного вида деятельности на другой. Исследование трансформационной динамики позволит разработать рекомендации по компенсации отрицательных воздействий среды, совершенствованию методов обучения и информационному обеспечению операторов и повысить надежность их работы при возникновении аварийных ситуаций.

Важно в экспериментах по исследованию динамики информационных процессов моделировать основные факторы, затрудняющие реальное протекание трансформаций, чтобы найти способы компенсации этих помех своевременному переключению операторов на состояние и стратегию, соответствующие возникшему режиму. Особое значение может иметь применение широкого спектра виброакустических воздействий как средств информирования оператора и управления его состоянием, а также синхронизации состояний всех членов оперативной смены.

Трансформация операторской стратегии нормального управления в стратегию аварийного управления возможна только при условии, что изменятся состояние оператора и общая психофизическая структура его организма. Известно, что переход от нормального состояния человека к стрессовому включает в себя множество трансформаций на всех уровнях организма — от клеточного, до организма в целом.

Даже в том случае, если обеспечена достаточная контролируемость и управляемость параметров энергообъекта, принципиальная возможность оперативной локализации и ликвидации аварии человеком должна определяться с учетом многих условий: трансформационной динамики объекта; скорости протекания аварийных процессов; запаса времени на управление при разных состояниях объекта; трансформационной динамики человека; его эмоциональной устойчивости; запаса стратегий; интеллектуальных, скоростных и силовых качеств человека-оператора. Определение необходимого специалисту запаса стратегий деятельности для успешной работы во всем диапазоне динамики управляемых процессов, а также реверсивных (обратных) трансформаций этих стратегий при смене режимов работы оборудования, в том числе при возникновении и ликвидации аварийных ситуаций, — необходимое условие создания фундаментальной теории и практических методов ускоренного и качественного обучения операторов. В связи с этим особое значение приобретает поиск путей повышения эффективности тренажно-моделирующих комплексов, в частности, путем более точного воспроизведения на них динамики состояний энергообъектов, параметров реальной физической среды, оперативных задач, условий и

процессов взаимодействия операторов между собой, с ЭВМ, другими автоматическими устройствами и системами [11.3, 11.20].

Безопасность энергетических объектов и их технико-экономическая эффективность в значительной степени зависят от учета эргономических и психологических факторов управления на всех стадиях проектирования, создания и освоения технологического оборудования и объекта в целом, включая средства автоматизации. Информационное обеспечение операторов, конструирование и применение тренажеров и других технических средств обучения персонала.

Для обеспечения оператора информацией по объекту управления в номинальных и аварийных режимах системы управления оснащают системами поддержки принятия решения (СППР) оператором объекта. СППР отвечает следующим требованиям:

формализуются только концептуальные связи, что делает математический аппарат более простым и наглядным;

применяемые алгоритмы пригодны для всех операторов энергообъекта;

имеется возможность определения алгоритмов и критериев поведения системы и ее элементов путем наблюдений;

имеется возможность автоматизации получения декларативных знаний по объекту управления;

система ориентируется на универсальные мини- и микроЭВМ и распространенные операционные системы, а также на современные языки программирования.

Определяющим при построении СППР является выбор принципов построения базы знаний (модели декларативных знаний) по объекту управления.

Так, если объектом управления являются энергетические объекты, то большая сложность протекающих процессов приводит к тому, что наиболее полные математические модели энергообъекта представляют собой системы дифференциальных уравнений высокого порядка. Кроме того, модель должна соответствовать тем представлениям об объекте управления, которыми обладает квалифицированный оператор. Принципиально важным является то, что степень подробности и точности модели определяется не характеристиками объекта управления, а закономерностями его отражения в сознании человека-оператора. Психический феномен отражения объекта управления (ОУ) будем называть образом ОУ. В [11.19] на основании анализа деятельности оперативного персонала сформулирован ряд положений, характеризующих образ ОУ, пригодный для построения его математической модели.

11.11. ТРАНСФОРМАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ЭРГОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Эргономические исследования систем человек — машина — среда (СЧМС) имеют особое значение для прогнозирования повышения эффективности и безопасности транспортных и технологических ком-

плексов, а также крупных инженерных сооружений.

Анализ динамики процессов фазовых и структурных переходов в термодинамике, металлургии, кристаллографии, системах автоматического управления, физиологии, многочисленные эргономические эксперименты и проекты СЧМС в разных отраслях народного хозяйства (в энергетике, химии, металлургии, на транспорте, в радиотехнических и вычислительных системах) согласно [11.21, 11.22] позволяют сформулировать следующие законы взаимной адаптации и трансформации структур [11.23], которые могут дополнить основы теории динамики эргономических систем.

Закон взаимной адаптации. Формирование и развитие любой системы есть процесс взаимной адаптации компонентов системы между собой и системы в целом с внешней средой. На основе этого закона уточнены некоторые важные для эргономики понятия и категории, такие как качества и свойства системы, ее структура, стратегия, сложность, эффективность, эргономические критерии и факторы сложности деятельности операторов, дивергенция, конвергенция и синхронизация компонентов системы, обучение операторов, эволюция и трансформация структур и стратегий системы и др.

Известно, что важнейшими качествами и свойствами системного объекта являются функциональные, структурные и системные. Функциональное свойство СЧМС — ее стратегию — можно определить как характеристики процессов взаимной адаптации СЧМС с внешней средой; структурные качества — как характеристики процессов взаимной адаптации внутренних компонентов СЧМС между собой; системные качества СЧМС, например эффективность, надежность, безопасность, — это совокупные характеристики процессов взаимной адаптации внутренних компонентов СЧМС между собой и СЧМС с внешней средой [11.20]. Аналогичные определения верны и для каждого компонента СЧМС, в частности для человека-оператора.

Взаимосвязанный анализ и синтез всех указанных уровней, факторов и параметров СЧМС для выработки оптимальных инженерных решений составляет главный методологический принцип, научную и практическую специфику эргономики.

Из закона взаимной адаптации следует, что необходимо исследовать не отдельно динамику человека, машины и среды как таковых, а динамику процессов взаимной адаптации между ними [11.23]. В расчет должны приниматься не собственные параметры человека, машины и среды, а факторы эффективности и сложности процессов взаимной адаптации между ними, в том числе эргономические (в частности, психологические) факторы сложности деятельности оператора F_j .

Общая методика эргономического проектирования и оптимизации систем отображения информации (пульта управления, станка, панели кабины самолета и т. п.) сводится к следующему. Пусть критерий сложности решения оператором задач определяется величиной S . Это может быть число

ошибок, затраты времени на решение и т.д. Обозначим через C_p его реальное значение, а через C_t теоретически оптимальное. Значения соответствующих факторов сложности будут F_{ip} и F_{it} . Параметры системы отображения информации обозначим через q_i , q_{ip} и q_{it} .

Экспериментально определяется вид статистической связи C_p и F_{ip} . Например, в экспериментах [11.24] это было линейное уравнение множественной регрессии

$$C_p = a_1 F_{1p} + a_2 F_{2p} + \dots + a_n F_{np} + a_0. \quad (11.7)$$

Если в это уравнение подставить аналитически рассчитываемые F_{it} , то получим минимальное значение критерия сложности

$$C_t = a_1 F_{1t} + a_2 F_{2t} + \dots + a_n F_{nt} + a_0. \quad (11.8)$$

Условием такой подстановки является принадлежность всех F_{ip} и F_{it} одной стратегии деятельности операторов, так чтобы $C_t = C_p(F_{1t}) = C_{max}$.

Максимально возможный прирост эффективности деятельности оператора составляет

$$\Delta Q = C_p - C_t.$$

Сравнивая (11.7) и (11.8), найдем те члены $a_j F_j$, для которых разности $a_j F_{jp} - a_j F_{jt}$ имеют наибольшие значения. Для выбранных F_{ip} определяются зависимости от q_{ip} , например, в виде

$$F_{jp} = b_1 q_{1p} + \dots + b_m q_{mp} + b_0 \quad (11.9)$$

и

$$F_{it} = b_1 q_{1t} + \dots + b_m q_{mt} + b_0. \quad (11.10)$$

Сравнивая (11.9) и (11.10), находим наибольшие разности $|b_i q_{ip} - b_i q_{it}|$ и соответствующие q_{ip} , воздействие на которые даст наибольший эффект в оптимизации F_{ip} и, следовательно, C_p . Далее подбираются именно те принципы эргономического проектирования информационных систем [11.24], которые позволяют максимально приблизить эти q_{ip} к q_{it} , F_{ip} к F_{it} , C_p к C_t и, следовательно, Q_p к $Q_t = Q_{max}$. Данная методология используется при проектировании ряда АСУ и тренажеров [11.20, 11.21, 11.24]. Реальное значение критерия сложности отражает рассогласованность между требуемыми (прогнозируемыми) и реальными процессами взаимной адаптации компонентов СЧМС.

Закон взаимной адаптации для живых систем. Существование и развитие живой системы (в том числе человека), а также смешанной системы (в том числе СЧМС) есть процесс взаимной опережающей многоуровневой адаптации компонентов системы между собой и системы с внешней средой.

Применительно к СЧМС, если возникает динамика внешней среды, так что изменяются процессы взаимной адаптации человека с машиной и средой, человек формирует прогноз и на его основе осуществляет опережающий процесс взаимной многоуровневой адаптации между собственными компонентами, изменяя структуру и стратегию собственных психофизиологических процессов, всей своей деятельности, воздействия на машину и среду. Новые структура и стратегия СЧМС в целом обеспе-

чивают ей высокие эффективность и безопасность в новых условиях, в которых неприемлемы прежние структура и стратегия. Опережающий характер взаимной адаптации проявляется в том, что если СЧМС, имеющая структуру $\bar{S}_i$ и стратегию $\bar{S}_i$, прогнозирует изменение фактора ее взаимной адаптации со средой F от F_1 до F_2 так, что в ожидаемых условиях эффективность стратегии $\bar{S}_i$ функционирования исходной структуры $\bar{S}_i$ станет ниже допустимой $Q_i(F_2) < Q^*$, то система создает прогноз такой новой своей структуры и процесса трансформации $\bar{S}_i$ и $\bar{S}_i$ в $\bar{S}_{i+1}$ и $\bar{S}_{i+1}$, что при $F = F_2$ имеет приемлемое (оптимальное) значение $Q_{i+1}(F_2) > Q^*$.

Основной функцией человека в СЧМС является формирование и реализация прогноза процессов взаимной многоуровневой адаптации компонентов системы между собой и системы в целом с внешней средой.

Такое прогнозирование, как и принятие решений, синтез и сравнение концептуальных моделей, является в значительной степени обратным процессом. Этими свойствами обладают и машины, моделирующие человеческие способности взаимной опережающей многоуровневой адаптации со средой. К таким машинам (например, автоматам, ЭВМ), как и СЧМС всех типов, применим второй закон взаимной адаптации.

Многоуровневый характер адаптации организма человека к динамическим внешним условиям доказан во многих исследованиях. В понятие многоуровневой адаптации человека входят также процессы его индивидуального развития, профессиональной ориентации и отбора, обучения, оперативной перестройки его психофизиологических процессов в ходе взаимной адаптации с машиной и средой. Машину также можно адаптировать к человеку на многих уровнях, среди которых выделим тотальный, контингентный, групповой, индивидуальный и индивидуально-оперативный. Каждый последующий уровень делает адаптированность машины к человеку более точной, но при этом сужает круг людей, которые легко взаимно адаптируются с данной машиной. При индивидуально-оперативной адаптации параметры машины отслеживают конкретное состояние конкретного оператора.

Чаще всего оптимальным оказывается групповой уровень адаптации [11.24], причем прирост эффективности работы операторов по сравнению с тотальной адаптацией (ориентировкой проектировщиков на характеристики «среднестатистического» человека) существенно превышает прирост стоимости машин. В случае, когда повышение точности адаптации пультов и информационных средств направлено на снижение аварийности системы, выигрыш (сумма предотвращенного ущерба) может быть на много порядков больше, чем дополнительные затраты на эргономическое совершенствование машин, которые, как правило, очень быстро окупаются.

Например, затраты на эргономическую реконструкцию операторского пункта аммиачного производства Щекинского химкомбината окупались примерно за полгода, тренажера Красноярскэнерго — за год.

Из второго закона взаимной адаптации следует, что создание автоматической системы — это в значительной степени процесс моделирования в машинах свойственной людям способности к взаимной опережающей многоуровневой адаптации со средой. В социальном аспекте это значит, что искусственная система (например, ЭВМ или система отображения информации), взаимодействуя с оператором, навязывает ему определенную стратегию $\underline{S}_n$, на которую ориентировались проектировщики.

В случае неблагоприятного исхода реального решения необходимо определить собственный вклад оператора в это решение $\underline{S}_o$ и влияние $\underline{S}_n$. Таким образом, соотношение между $\underline{S}_o$, $\underline{S}_n$ и $\underline{S}_p$ позволяет выявлять и устранять «узкие места» в системе, находить пути ее эффективности и безопасности. Оно также имеет юридическое значение для определения доли вины в авариях как лиц, непосредственно участвовавших в управлении (операторов), так и лиц, навязавших свою стратегию операторам посредством конструкции машин, информационных процессов, инструкций и т. д.

Третий закон взаимной адаптации, закон структур-стратегий утверждает полиструктурность человека как компонента СЧМС. Человек является носителем ряда различных структур-стратегий взаимной адаптации с машиной и средой. Этот закон относится к любой сложной системе, в том числе к СЧМС. Разнообразие типов внутренних компонентов человека, СЧМС и процессов взаимной адаптации между компонентами обуславливает возможность существования разных структур, составляющих дискретный ряд. Как правило, человек реализует в каждый момент одну стратегию. Каждая структура-стратегия S_i имеет свои особые характеристические кривые $Q_i(F_j)$, где Q_i — эффективность системы при i -й структуре-стратегии; F_j — j -й эргономический фактор процесса взаимной адаптации человека с машиной и средой.

На рис. 11.5 показаны экспериментальные характеристические кривые трех стратегий восприятия оператором информации: отдельными знаками $\underline{S}_a$, малыми группами $\underline{S}_b$ и блоками $\underline{S}_c$.

Таким образом, эффективность (надежность, скорость, качество, безопасность) действий оператора в разных условиях описывается не единственной кривой, а набором кривых, соответствующих числу имеющихся у него структур-стратегий деятельности.

Показатель универсальной стратегии $\underline{S}_i$ определяется интервалом значений ΔF_j , в котором она может реализоваться. Чем больше интервал, тем больше универсальность стратегии. Специализированность стратегии определяется уровнем ее эффективности Q_i в интервале значений ΔF_j .

На основе закона структур-стратегий может

быть сформулировано правило инвариантности интегральной эффективности системы: при постоянных составе компонентов и их активности интегральная эффективность системы одинакова при всех ее возможных структурах-стратегиях:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \int_{F_{ji \min}}^{F_{ji \max}} Q_i dF_j = \text{const}, \quad (11.11)$$

где $F_{ji \min}$ и $F_{ji \max}$ — минимальное и максимальное значения j -го фактора для i -й стратегии; $F_{ji \max} - F_{ji \min} = \Delta F_{ji}$ — индекс универсальности i -й стратегии по фактору j ; Q_i — эффективность i -й стратегии.

Закон трансформаций. Трансформация одной структуры-стратегии системы в другую может происходить только через общее для обеих структур-стратегий состояние системы, отображаемое пересечением их характеристических кривых (гиперповерхностей).

На этом законе основана трансформационная теория динамики систем [11.21 — 11.24], доказавшая частный характер экспериментальной теории обучения, описывающей процессы обучения как монотонные.

Трансформационная теория является основанием для анализа причин снижения безопасности СЧМС и поиска эргономических принципов обеспечения безопасности системы [11.20]. На рис. 11.8 показаны пересекающиеся (ассоциированные) характеристические кривые нормальной стратегии $\underline{S}_n$ оператора и стратегии $\underline{S}_A$, требующейся от него для ликвидации аварии. На рис. 11.9 показаны процессы трансформации $\underline{S}_n$ в $\underline{S}_A$, а затем, после ликвидации аварии, обратно через трансформационную точку nA (см. рис. 11.8). Штриховыми линиями показаны возможные срывы деятельности оператора ($Q \rightarrow 0$) при прямой трансформации $\underline{S}_n \rightarrow \underline{S}_A$ и при обратной $\underline{S}_A \rightarrow \underline{S}_n$, если значение F (например, воспринимаемый поток сигналов) слишком быстро возрастает при возникновении аварии и уменьшается после ее ликвидации. Отсюда следует требование специальной организации процессов трансформации состояний оператора и информационной системы для обеспечения безопасности СЧМС.

Необходимо сделать примечание: так как $Q_i(F_j)$ величины случайные, то отображающие эти зависимости характеристические кривые (гиперповерхности) стратегий с учетом разброса значений случайных величин имеют форму «трубок», таким образом, пересечение двух характеристических кривых (гиперповерхностей) отображается не точкой, а областью на плоскости или в многомерном пространстве. Причем траектории изменения состояния системы при трансформациях ее структур-стратегий при увеличении значений F_j и их уменьшении, т.е. при «прямых» и «обратных» трансформациях могут быть разными: обычно наблюдается эффект «гистерезиса», но возможны и опережающие трансформации, основанные на прогнозе.

Структура трансформируется в том случае, если в пределах возникающих или прогнозируемых

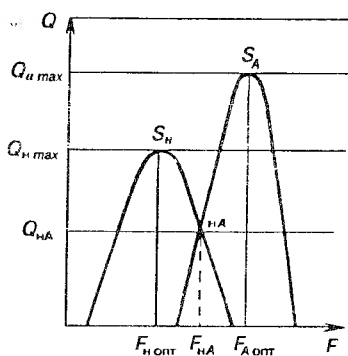


Рис. 11.8. Динамика эффективности деятельности оператора Q при переходе от нормальной стратегии S_N к аварийной S_A и обратно:

F — фактор сложности задач (например, объем поступающей информации); $F_{\text{опт}}$ — оптимальный объем поступающей информации

изменений значений фактора взаимной адаптации человека со средней соответствующая ей стратегия не может обеспечить удовлетворительного уровня эффективности его деятельности.

Новые структуры-стратегии у оператора возникают либо как результат социального обмена опытом (обучения), либо как его творческое достижение.

В соответствии с законом трансформаций новая структура может возникнуть только на базе предыдущей структуры путем частичной дезадаптации прежней структуры, причем такая декомпозиция должна быть достаточной для получения дополнительных степеней свободы компонентов системы, необходимых для перестройки структуры. При этом сохраняется достигнутая при старой структуре взаимная адаптация части компонентов, которая соответствует новой структуре.

Скорость трансформации зависит от степени достоверности, определенности и полноты прогноза формирования новой структуры и доли ее готовых блоков, содержащихся в прежней структуре.

Следствия из закона трансформации. Если структура системы S_i не имеет общих структурных элементов со структурой $\bar{S}_{i+n}$ и характеристическая кривая (гиперповерхность) ее стратегии $\underline{S}_i$ не пересекается с характеристической кривой (гиперповерхностью) стратегии $\bar{S}_{i+n}$, то переход системы от структуры-стратегии $\bar{S}_i$ к $\bar{S}_{i+n}$ может происходить только путем последовательных трансформаций — переходов через промежуточные структуры-стратегии $\bar{S}_{i+1}$, $\bar{S}_{i+2}$ и т.д., чтобы нашлась такая структура $\bar{S}_{i+n-m}$, которая имеет общие элементы со структурой $\bar{S}_{i+n}$, или характеристическая кривая (гиперповерхность) стратегии $\underline{S}_{i+n-m}$ пересекается с характеристической кривой (гиперповерхностью) стратегии $\underline{S}_{i+n}$. Если в качестве примеров стратегии взять знания, умения, мысли, образы памяти, то закон трансформации описывает образование новых знаний, выработку навыков и умений, их интерференцию между

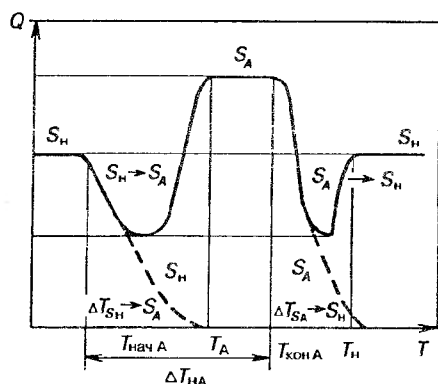


Рис. 11.9. Трансформация стратегии нормального управления S_N в аварийную S_A при изменении F от F_N до F_A и обратно:

штриховыми линиями показаны срывы деятельности оператора ($Q_N \rightarrow 0$; $Q_A \rightarrow 0$) при слишком быстрых изменениях F ; T — время; $T_{\text{нач A}}$; $T_{\text{кон A}}$ — моменты времени начала и конца аварии; ΔT_{NA} — длительность ликвидации аварии

собой, переносы, построение умозаключений, познавательный процесс, а также возникновение и роль ассоциаций в трансформации и связывании образов и мыслей.

Может быть дана более краткая формулировка закона трансформаций: трансформации (взаимо-переходы) возможны только между ассоциированными структурами-стратегиями.

На этом следствии из четвертого закона основана трансформационная теория обучения динамики систем. Эта теория, носящая весьма общий характер, описывает трансформации структур, состояний всех компонентов СЧМС, а также возникновение трансформационные процессы при фазовых переходах в металлах, в пароводяной смеси при пленочном и пузырьковом кипении, в физиологии человека и т.д.

Формирование структуры-стратегии систем $\bar{S}_{i+n}$ может начинаться либо с трансформации предыдущей структуры $\bar{S}_{i+n-m}$ в структуру $\bar{S}_{i+m}$ с последующим формированием стратегии $\underline{S}_{i+n}$ либо с формирования стратегии $\underline{S}_{i+n}$ с последующим формированием структуры $\bar{S}_{i+n}$. В основе последующего формирования соответственно стратегии или структуры лежит процесс взаимной адаптации между ними.

Изменение стратегии функционирования СЧМС, обусловленное процессом взаимной адаптации ее с внешней средой, приводит к дезадаптации между стратегией и прежней структурой. Если изменение внешней среды значительно, а ее лабильность низка, т.е. велико сопротивление среды воздействиям СЧМС, направленным на восстановление взаимной адаптации ее с внешней средой, то выживание СЧМС возможно только при соответствующем изменении ее структуры. Если СЧМС не изменит своевременно свою структуру, то взаимная дезадаптация системы и среды, структуры и стратегии системы, внутренних компонентов СЧМС обусловит ее слишком низкую эффективность; потребуются чрезмерные энергетические и времен-

ные затраты для поддержания жизнеспособности СЧМС, что может угрожать ее безопасности.

Преимущество человека перед техническими компонентами СЧМС состоит именно в том, что он с помощью опережающей активности способен осуществлять трансформацию структуры и стратегии СЧМС заблаговременно, до того как внутреннего или внешнего дезадаптация станет критической, опасной для существования системы. При трансформации $\underline{S}_H$ в $\underline{S}_A$ (см. рис. 11.9) происходит падение эффективности управления до уровня Q_{HA} , который может быть ниже критического для данной системы. Анализ процессов трансформации $\underline{S}_H$ в $\underline{S}_A$ имеет первостепенное значение для создания эргономической теории безопасности СЧМС. Практические методы повышения безопасности систем должны быть направлены на повышение трансформационной эффективности Q_{HA} и сокращение длительности трансформационного периода. Очень важна безопасность и обратной трансформации $\underline{S}_A \rightarrow \underline{S}_H$. В тех случаях, когда $\underline{S}_H$ и $\underline{S}_A$ не ассоциированы между собой (не имеют общих состояний), должна предусматриваться специально для быстрой и эффективной трансформации промежуточная структура-стратегия $\underline{S}_{\Pi}$.

Закон базовых дивергентных структур-стратегий. Для сохранения жизнеспособности и подготовки к значительным трансформациям своей конвергентной структуры-стратегии, неадекватной возникшим условиям, система реализует базовую дивергентную структуру-стратегию. Базовые структуры-стратегии $\underline{S}_{bd}$ формируются фило- или онтогенетически и отличаются своей универсальностью, неспецифичностью, пригодностью для выживания с пониженной, но приемлемой эффективностью в широком диапазоне динамических условий. В дальнейшем, если условия стабилизируются, происходит трансформация $\underline{S}_{bd}$ в высокоэффективную специализированную, конвергентную структуру-стратегию.

На рис. 11.10 показан процесс переходов системы от конвергентной стратегии $\underline{S}_x$ к базовой дивергентной стратегии $\underline{S}_{bd}$ и далее к новым

специализированным стратегиям $\underline{S}_y$ и $\underline{S}_z$. Прямой переход от $\underline{S}_x$ и $\underline{S}_y$ невозможен, поскольку трансформационная точка x_{xy} соответствует уровню эффективности ниже минимально допустимой $Q_{xy} < Q_{min}^*$, при которой возникает угроза гибели системы (например, срыва деятельности человека-оператора).

Понятие базовой дивергентной структуры имеет особое значение для анализа процессов принятия коллективных решений. Например, переход оператора от специализированной структуры-стратегии к базовой дивергентной структуре дает ему возможность в ходе общения понять стратегию коллеги, структура-стратегия которого прямо не ассоциирована с его собственной, и при достаточной аргументации и соответствующих условиях перейти на эту новую теорию. На принципе ассоциированности стратегий (базовых дивергентных и специализированных) и их взаимных трансформаций основана идея создания систем гибридного интеллекта [11.24].

Основными принципами построения систем гибридного интеллекта являются: интеграция интеллектуальных способностей всех участников — операторов и разработчиков программ ЭВМ, информационных средств; общие ответственность и престиж всех участников; гибкая иерархия между ними; индивидуальная адаптация частной, профессиональной информации и групповая адаптация интегральной, общей информации.

На основе сформулированных законов строится новый тип моделей и номограмм трансформационной динамики процессов адаптации компонентов СЧМС между собой и системы в целом с внешней средой.

Принципиальная структура такой номограммы приведена на рис. 11.11.

В квадранте I представлена динамика параметра F объекта управления $\underline{F}(T)$. В квадранте II представлен процесс отображения динамики объекта в информационной системе, передачи этих данных человеку и восприятия их человеком. Объективное значение $\underline{F}_j$ отражается человеком в виде некоторого значения субъективного, психологического фак-

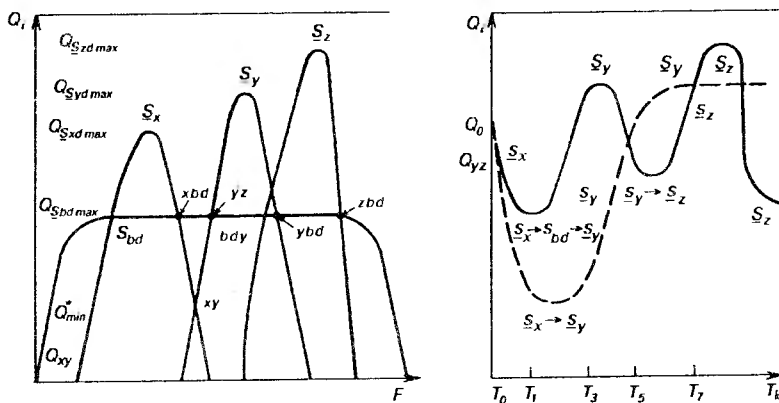


Рис. 11.10. Ускоренная трансформация специализированных структур-стратегий S_x , S_y , S_z через базовую структуру-стратегию S_{bd}

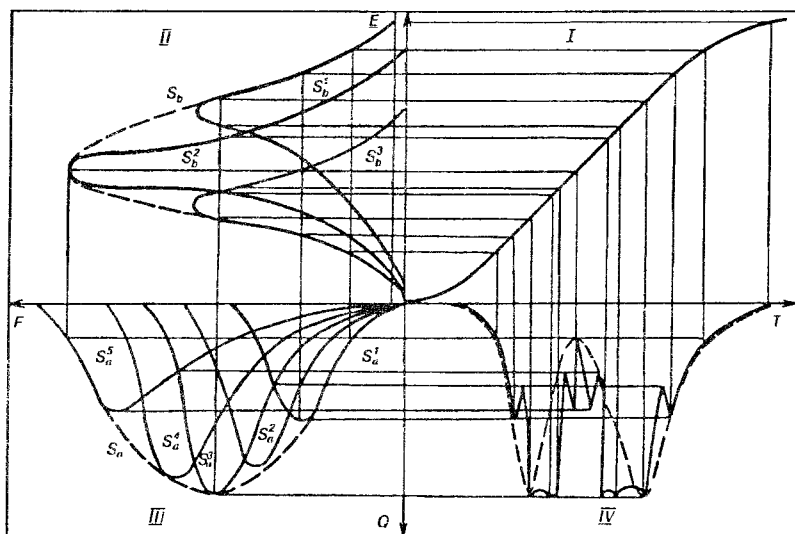


Рис. 11.11. Принцип построения номограммы адаптационной динамики систем человек—машина—среда

тора сложности F_j . Например, на мнемосхеме энергоблока в определенной ситуации может быть отображено N_1 сигналов, а оператор примет во внимание N_2 из них. N_2 может быть меньше N_1 , тогда наблюдается пропуск сигналов. Но N_2 может быть и больше N_1 , если, например, оператор добывает информацию с помощью вызывной системы контроля или дисплея ЭВМ.

Отношение F_j/E_j , являющееся коэффициентом рефлексии человеком-оператором параметров объекта, зависит от многих условий, в том числе от технических данных приборов контроля, формируемого человеком прогноза динамики объекта, психофизиологического и эмоционального состояния человека, его внимания, применяемой стратегии восприятия и переработки информации. Опыты показали, что оператор может воспринимать информацию, например от мнемосхемы энергоблока, отдельными элементами S_b^1 , малыми функционально связанными группами S_b^2 или целиком оценивать состояние агрегатов S_b^3 . Обобщающая характеристическая кривая этих стратегий S_b является обобщенной индивидуальной характеристикой оператора (или группы, контингента операторов). В зависимости от отбора операторов, методов, программ и средств их обучения и тренировки, применяемых информационных средств в АСУ (например, структуры мнемосхемы или форматов данных на дисплее ЭВМ) стратегии восприятия и переработки информации могут варьироваться в широких пределах. При проведении аварийных испытаний на энергоблоках и в энергообъединениях [11.20, 11.21, 11.24] установлено, что под воздействием стресса операторы часто включают в число аварийных многие второстепенные сигналы, случайно возникающие на объекте и не имеющие отношения к аварии, что резко увеличивает общее время решения аварийных задач. В связи с этим эффективным методом оптимизации стратегии рефлексии аварийного со-

стояния объекта управления является регулирование интенсивности потока сигналов путем разбиения сигналов на приоритетные группы и задержки в буферном накопителе второстепенных технологических и технико-экономических параметров, а также применения других эргономических и инженерно-психологических принципов выбора состава и структуры системы отображения информации и их индивидуальной адаптации к оператору с учетом его состояния, решаемых задач и эффективности деятельности.

Характеристические кривые стратегий управления, применяемых оператором при выборе и реализации решения, представлены в квадранте III, где показана зависимость интенсивности (или эффективности) реакции от значений психологического фактора сложности и типа стратегии деятельности. Интенсивность (эффективность) реакции оператора, его воздействия на объект зависит как от обученности, так и от применяемых средств и программ управления. Воздействие может производиться на каждый орган отдельно или целиком на агрегат или подсистему энергоблока или энергосистемы.

Каждая из стратегий управления имеет свою характеристическую кривую $S_a^1 \rightarrow S_a^5$. Возможна грубая аппроксимация этих кривых обобщенной характеристической кривой S_a . Как и для случая процессов рефлексии информации (т.е. ее восприятия и переработки), такая аппроксимация ведет к существенной потере качественных и количественных данных о динамике деятельности оператора и системы человек—машина—среда в целом.

Предлагаемые номограммы вполне пригодны для описания анализа и прогнозирования динамики процессов автоматического управления энергетическими и другими объектами. Для этого достаточно заменить оператора автоматическим регулятором, процессы рефлексии — динамическими характеристиками датчиков и устройств

преобразования входной информации, интенсивность воздействия оператора — характеристиками исполнительных механизмов систем автоматического управления. В результате получим динамику процессов управления, специфической особенностью которой будет отображение качественных изменений структур (параметров настройки, схем, программ) автоматического управления и структур объекта.

В эргономических системах трансформации стратегий операторов наблюдаются весьма четко и при обучении операторов, и при их практической работе. Номограмма трансформационной динамики СЧМС позволяет исследовать процессы взаимной адаптации человека с машиной и средой при различных индивидуальных особенностях операторов, уровнях их обученности, а также структурах и параметрах управляемого объекта, системы отображения информации, органов управления. Данная номограмма строится по замкнутому циклическому принципу: изображается начальное, собственное отклонение параметра объекта $F(T_1)$, затем находится стратегия рефлексии оператора и определяется фактическое значение $F(T_1)$, далее выявляется стратегия принятия решений и воздействий оператора и соответствующее ей и полученному значению $F(T_1)$ значение $Q(T_1)$, определяется динамика воздействия $Q(T)$, из отклонения параметра вычитается результат воздействия оператора на параметр объекта и его динамику $F(T_2)$, после этого начинается новый цикл: определение рефлексии и значения F_2 и т.д. Результатом такого исследования, моделирования и графического анализа являются прогноз динамики СЧМС, выбор оптимальных эргономических и инженерных решений, оценка технико-экономической эффективности вариантов систем отображения информации, программ ЭВМ, органов управления, среды, организации и стимулирования труда операторов, их обучения и переподготовки и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 11.1. Зигель А., Вольф Дж. Модели группового поведения в системе человек—машина. М.: Мир, 1973.
- 11.2. Крылов А.А. Человек в автоматизированных системах управления. Л.: ЛГУ, 1972.
- 11.3. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- 11.4. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах. М.: Советское радио, 1974.
- 11.5. Котик М.А., Емельянов А.М. Ошибки управления. Психологические причины, метод автоматизированного анализа. Таллинн: Валгус, 1985.
- 11.6. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974.
- 11.7. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1981.
- 11.8. Минский М. Фреймы и представление знаний. М.: Энергия, 1979.
- 11.9. Элти Дж., Кумбе М. Экспертные системы. Концепции и примеры. М.: Финансы и статистика, 1987.
- 11.10. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.
- 11.11. Balzer D., Böhme B. Zur Einfluss der künstlichen Intelligenz auf Theorie und Praxis der Prozessautomatisierung// Messen-Steuern-Regeln. 1987. №12. S. 32.
- 11.12. Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. М.: Прогресс, 1979.
- 11.13. Ларичев О.А. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979.
- 11.14. Гогиашвили Г.Г. Автоматизация принятия решений в системах управления. Тбилиси: Мецниереба, 1985.
- 11.15. Башлыков А.А. Проектирование систем принятия решений в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 11.16. Чачко А.Г. Подготовка операторов энергоблоков. Алгоритмический подход. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 11.17. Ципцора Р.Д. Основные принципы построения станционных тренажеров // Электрические станции. 1986. №5. С. 13—17.
- 11.18. Венда В.Ф. Инженерная психология. М.: Машиностроение, 1982.
- 11.19. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации. М.: Машиностроение, 1982.
- 11.20. Фролов К.В., Дьяков А.Ф., Венда В.Ф. Эргономические и психологические факторы надежности и эффективности энергетических объектов // Электричество. 1979. №2.
- 11.21. Дьяков А.Ф., Венда В.Ф., Магазин Я.М. Методические рекомендации по обучению и тренажерам для операторов ТЭС и АЭС. Красноярск: Красноярскэнерго, 1985.
- 11.22. Шеридан Т.Б., Феррел У.Р. Системы «человек—машина»: Пер. с англ. / Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1980.
- 11.23. Венда В.Ф. О законе взаимной адаптации человека и машины // Вестник АН СССР. 1985. №1.
- 11.24. Венда В.Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации. М.: Машиностроение, 1975.

Раздел 12

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

12.1. Виды и обозначение конструкторских документов	234	Обозначения общего применения (ГОСТ 2.721-74). (259). Электрические машины (ГОСТ 2.722-68) (259). Катушки индуктивности, реакторы, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители (ГОСТ 2.723-68) (259). Токосъемники (ГОСТ 2.726-68) (263). Разрядники. Предохранители (ГОСТ 2.727-68) (263). Резисторы. Конденсаторы (ГОСТ 2.728-74) (263). Электроизмерительные приборы (ГОСТ 2.729-68) (264). Полупроводниковые приборы (ГОСТ 2.730-73) (265). Источники света (ГОСТ 2.732-68) (269). Химические источники тока (ГОСТ 2.742-68) (269). Элементы цифровой техники (ГОСТ 2.743-82) (270). Электронагреватели, устройства и установки электротермические (ГОСТ 2.745-68) (272). Коммутационные устройства и контактные соединения (ГОСТ 2.755-87) (272). Элементы аналоговой техники (ГОСТ 2.759-82) (272). Воспринимающая часть электромеханических устройств (ГОСТ 2.756-76) (275).
12.2. Общие требования к оформлению чертежей и схем	238	
12.3. Компьютеризация чертежных работ	240	
12.4. Оформление чертежей электротехнических изделий	242	
Чертежи жгутов, кабелей, проводов (242). Чертежи изделий с обмотками и магнитопроводами (242). Чертежи печатных плат (245). Чертежи с применением электромонтажа (245). Чертежи интегральных микросхем (247)		
12.5. Оформление схем	251	
Классификация и обозначение схем (251). Схемы структурные и функциональные (251). Схемы принципиальные (251). Схемы соединений и подключения (252). Схемы общие и расположения (255). Схемы обмоток изделий с обмотками (255). Схемы цифровой вычислительной техники (258)		
12.6. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах	259	
12.7. Примеры условных графических обозначений в электрических схемах	259	Список литературы
		276

12.1. ВИДЫ И ОБОЗНАЧЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ ДОКУМЕНТОВ

Документация, выполняемая в процессе проектирования, носит название проектная, проектно-конструкторская или конструкторская документация.

Проектирование — это процесс создания проекта, прототипа, прообраза предполагаемого или возможного технического решения объекта: изделия в промышленности или сооружения в строительстве.

Обычно проект состоит из комплекта документов, в которых содержится информация об устройстве, составе, принципе действия, условиях эксплуатации проектируемого объекта.

Конструкторскую документацию составляют графические и текстовые документы, которые определяют конструкцию технического предмета и содержат данные, необходимые для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

К графическим конструкторским документам относятся чертежи и схемы. Чертеж — документ, содержа-

щий изображение технического предмета или его составной части и другие данные, поясняющие функциональное назначение предмета и позволяющие его изготовить. Схема — документ, содержащий условные графические изображения составных частей технического предмета и связей между составными частями.

Текстовые конструкторские документы содержат речевую информацию на естественном или формализованном языке. Текстовые документы подразделяют на документы, содержащие в основном сплошной текст (технические условия, технические описания, расчеты, пояснительные записки, паспорта, инструкции и т. д.), и документы, содержащие текст, разбитый на графы (спецификации, ведомости, таблицы и т. д.).

Наиболее употребительными конструкторскими документами являются чертеж общего вида, чертеж детали, спецификация, сборочный чертеж, схема, пояснительная записка, расчеты.

Чертеж общего вида содержит изображение сборочной единицы и сведения, необходимые для пояснения принципа работы и взаимодействия составных частей сборочной единицы. На рис. 12.1

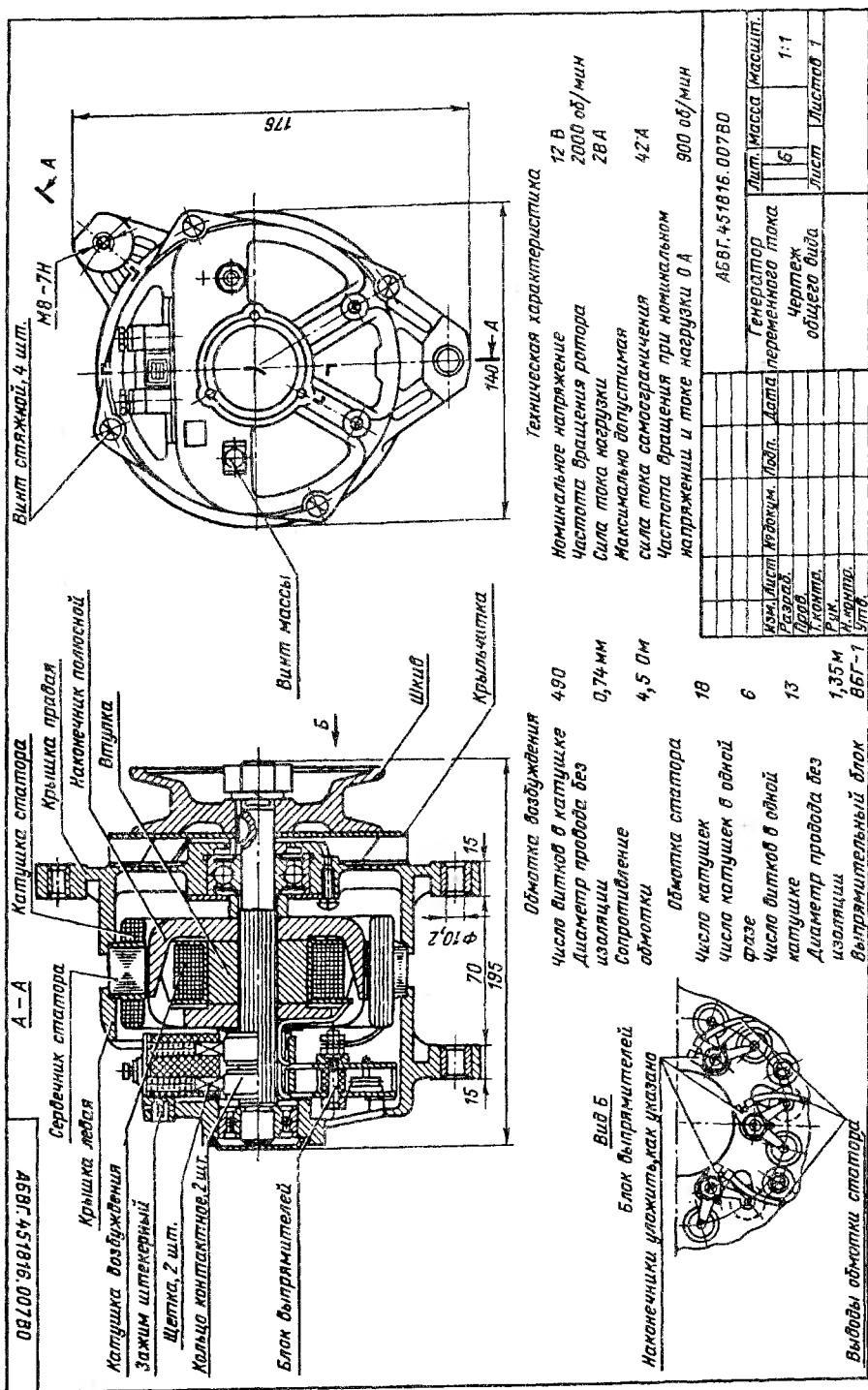


Рис. 12.1. Чертеж общего вида «Генератор переменного тока»

приведен чертеж общего вида автомобильного генератора переменного тока. На чертеже представлено изображение генератора, состоящее из продольного разреза, внешнего вида с левой стороны и дополнительного вида (вид В) на блок кремниевых диодов. Чертеж содержит также текстовую информацию в виде технической характеристики, данных по обмоткам и наименований составных частей генератора. На изображение нанесены габаритные и присоединительные размеры.

В практике конструирования часто чертеж общего вида не разрабатывают, а на сборочном чертеже (см. ниже) приводят соответствующие сведения.

Чертеж детали — это конструкторский документ, содержащий изображение детали и сведения, необходимые для ее изготовления и контроля (размеры, предельные отклонения, шероховатость поверхности, сведения о материале и, др.). На рис. 12.2 приведено графическое изображение детали «Вал» с выносным элементом I и сечением А-А, нанесены все размеры и их предельные отклонения, обозначена шероховатость поверхностей, даны допустимые отклонения формы поверхностей и их взаимного расположения, указана твердость металла и некоторые другие данные.

Спецификация является текстовым документом, который содержит сведения о составе сборочной единицы. Перечень составляется по определенной

форме и в определенной последовательности, установленной ГОСТ 2.108-68. На рис. 12.3 показан пример спецификации.

Сборочный чертеж содержит упрощенное изображение сборочной единицы и сведения, необходимые для ее изготовления (сборки) и контроля. На сборочном чертеже «Гнездо» (рис. 12.4) составные части сборочной единицы снабжаются полками-выносками, на которых проставляются номера позиций в соответствии с порядковым номером в спецификации. Приведены необходимые размеры и требования по проведению пайки и покрытию поверхностей.

Схема представляет собой конструкторский, документ, на котором в виде условных графических обозначений показаны составные части изделия и связи между ними (ГОСТ 2.701-84). Подробнее о схемах см. далее.

Пояснительная записка (ГОСТ 2.106-68) содержит в общем случае описание устройства и принципа действия изделия, технико-экономические показатели, обоснование принятых при разработке технических решений, назначение и область применения проектируемого изделия.

Расчеты включают эскиз или схему рассчитываемого изделия, задачу расчета, данные для расчета, условия расчета, непосредственно расчет, заключение.

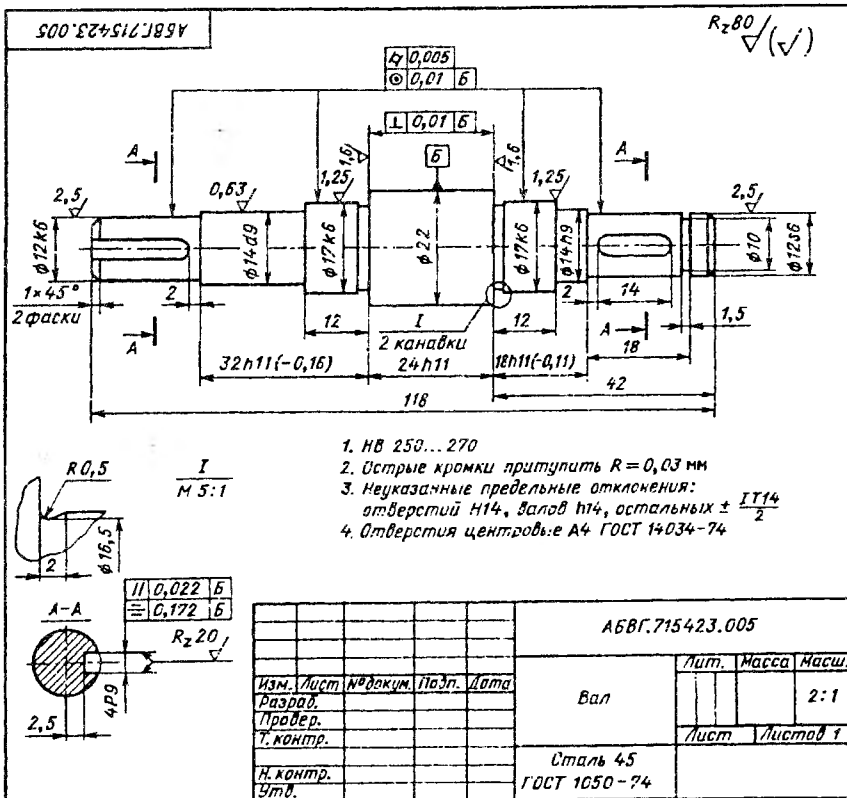


Рис. 12.2. Чертеж детали «Вал»

[illegible]

Рис. 12.3. Спецификация «Кабель ВЧ»

В электротехнической промышленности часто используется *электромонтажный чертеж*, который содержит данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия.

Каждый конструкторский документ имеет шифр по ГОСТ 2.102-68. Так, чертеж общего вида имеет шифр ВО, сборочный чертеж — СБ, пояснительная записка — ПЗ и т. д. Чертеж детали и спецификация шифра не имеют. Это обусловлено тем, что эти документы приняты за основные для детали и сборочной единицы.

По ГОСТ 2.201-80 каждому изделию и конструкторскому документу присваивается обозначение, которое включает в себя четырехзначный буквенный код организации-разработчика, шестизначный цифровой код классификационной характеристики изделия и трехзначный порядковый регистрационный номер изделия.

Пример обозначения изделия: АВВГ.
757455.001 (АВВГ — код организации-разработчи-
ка, 757455 — классификационная характеристика,
001 — номер изделия).

Код классификационной характеристики присваивают изделию по «Классификатору машиностроения и приборостроения» (Классификатору ЕСКД).

Классификатор ЕСКД представляет собой систематизированный свод наименований всех разработанных и разрабатываемых изделий во всех отраслях народного хозяйства.

Обозначение основного конструкторского документа совпадает с обозначением изделия. К обозначениям других конструкторских документов добавляется их шифр. Например, сборочный чертеж изделия (сборочной единицы) будет иметь обозначение АБВГ. 342711.001СБ.

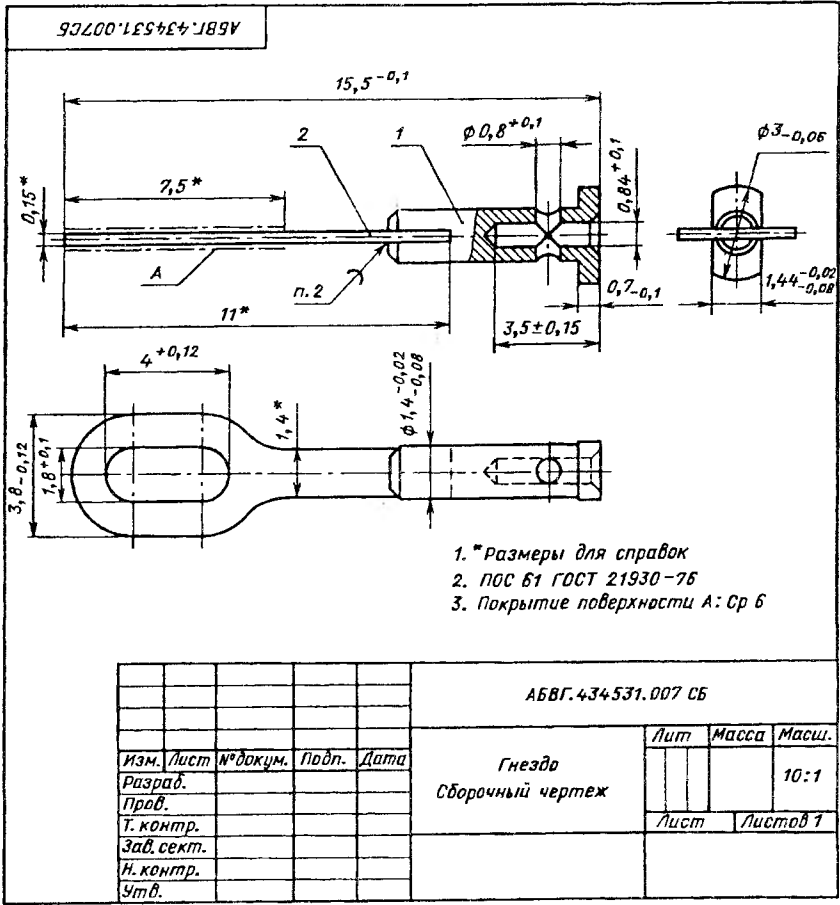


Рис. 12.4. Сборочный чертеж «Гнездо»

12.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЧЕРТЕЖЕЙ И СХЕМ

Правила оформления документов, их виды и комплектность при проектировании изделий и сооружений устанавливают стандарты на конструкторскую и проектную документацию.

Существует несколько систем государственных стандартов, определяющих правила оформления технической документации. Основной среди них является «Единая система конструкторской документации» — ЕСКД, которая содержит комплекс государственных стандартов, устанавливающих правила и положения по оформлению, разработке и обращению конструкторских документов на изделия, выпускаемые предприятиями. Правила и положения ЕСКД распространяются также на научную и учебную литературу в той части, в которой они могут быть применены и не регламентируются специальными стандартами и нормативами.

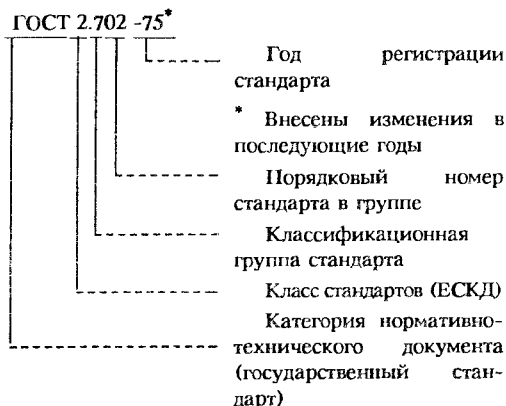
Обозначение стандарта ЕСКД строится на классификационном принципе и состоит из указания категории стандарта, системы, группы, порядково-

Стандарты ЕСКД распределены по следующим группам:

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий в конструкторских документах
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения конструкторских документов (учет, хранение, дублирование, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных и судостроения
9	Прочие стандарты

го номера стандарта в группе, года утверждения стандарта.

Пример обозначения стандарта ЕСКД «Правила выполнения электрических схем»:



Кроме ЕСКД в электротехнической промышленности используются другие системы стандартов для оформления конструкторских документов.

Общие правила выполнения чертежей и схем изложены в основном в 1-й и 3-й группах стандартов ЕСКД.

Форматы (ГОСТ 2.301-68). За основные форматы приняты: А0 — 841×1189 мм, А1 — 594×841 мм, А2 — 420×594 мм, А3 — 297×420 мм, А4 — 210×297 мм. Дополнительные форматы образуются увеличением коротких сторон основных форматов на величину, кратную их размерам.

Основная надпись (ГОСТ 2.104-68). В графах основной надписи указывают: наименование изделия, обозначение документа, обозначение материала (только на чертежах деталей), литеру по ГОСТ 2.103-68, массу изделия, масштаб, порядковый номер листа, общее количество листов документа, наименование или различительный индекс предприятия, характер работы, фамилии и подписи лиц, разработавших документ, дату подписания документа. Основную надпись располагают в правом нижнем углу конструкторского документа.

Шрифты чертежные (ГОСТ 2.304-81). Все надписи на чертежах и схемах выполняются чертежным шрифтом. Образцы выполнения надписей чертежным шрифтом см. на рис. 12.1—12.4.

Линии (ГОСТ 2.303-68). Толщина сплошной основной линии, которой чертится видимое изображение предмета, должна быть в пределах 0,5 — 1,4 мм в зависимости от размеров и сложности изображения. Наименьшая толщина линии чертежа, выполненного в карандаше, 0,3 мм. На рис. 12.4 использована большая часть стандартных линий.

Масштабы (ГОСТ 2.302-68). Масштаб — это отношение какого-либо размера на чертеже к соответствующему размеру предмета. Установлены следующие масштабы изображений на чертежах:

а) масштабы уменьшения: 1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5;

1:10; 1:15; 1:20; 1:25; 1:40; 1:50; 1:75; 1:100; 1:200; 1:400; 1:500; 1:800; 1:1000;

б) масштабы увеличения: 2:1; 2,5:1; 4:1; 5:1; 10:1; 20:1; 40:1; 50:1; 100:1.

Стандартные изображения (ГОСТ 2.305-68). Изображения на чертеже в зависимости от их содержания разделяются на виды, разрезы, сечения.

Проекция обращенной к наблюдателю видимой части предмета носит название в и д. Невидимые части предмета на видах показываются штриховыми линиями или не показываются вообще. Принято шесть основных видов: спереди, сверху, слева, справа, снизу, сзади. Кроме того, могут быть дополнительные и местные виды.

Разрезы применяются для того, чтобы показать внутреннее устройство предмета. При выполнении разрезов для большей наглядности чертежа могут использоваться условности: тонкие ребра не заштриховываются, отверстия в круглом фланце условно выкапываются в плоскость разреза и др.

Изображение фигуры, лежащей в секущей плоскости, носит название с е ч е н и е. Сечение проще выполнить, чем разрез, так как не надо показывать контуры предмета, расположенные за секущей плоскостью. Для большей наглядности фигуру сечения заштриховывают. Образцы штриховки различных материалов см. в ГОСТ 2.306-68.

Нанесение размеров и предельных отклонений (ГОСТ 2.307-68). Графическое оформление размеров на чертеже осуществляется при помощи размерных линий со стрелками, выносных линий и размерных чисел. Размерные и выносные линии выполняются сплошной тонкой линией. Размерные линии предпочтительно наносить вне контуров предмета.

Размерные числа определяют размеры предмета, выраженные в миллиметрах, без указания единиц измерения. Размерные числа располагаются на высоте 1—2 мм над размерной линией. Наиболее употребительная высота цифр 3,5—5 мм.

Все размеры на чертеже детали должны иметь указание о точности изготовления. Для этого после размерного числа указываются предельные отклонения этого размера. Часто предельные отклонения нескольких размеров низкой точности указывают одной общей записью в технических требованиях (см. рис. 12.2).

Указание допусков формы и расположения поверхностей (ГОСТ 2.308-79). В процессе изготовления происходит отклонение формы поверхностей от первоначально заданной. Данные о допусках формы поверхностей и их взаимном расположении указывают в прямоугольной рамке, разделенной на несколько частей. В первой помещают знак допуска, во второй — числовое значение допуска, в третьей и последующих — буквенное обозначение базы (см. рис. 12.2).

Указание шероховатости поверхностей (ГОСТ 2.309-73). Поверхность детали не является абсолютно гладкой. На ней имеются неровности, форма и размер которых зависят от материала

детали и способа обработки поверхности. На чертеже детали следует указывать шероховатость всех поверхностей независимо от методов их образования.

Для обозначения шероховатости используется условный знак (см. рис. 12.2), над которым указывается высота микронеровностей поверхности, выраженная в микрометрах. Обозначение шероховатости обычно располагают на линиях контура, на выносных линиях, на полках линий выносок.

Дополнительные сведения по оформлению конструкторских документов приведены в Списке литературы.

12.3. КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ЧЕРТЕЖНЫХ РАБОТ

Применение компьютерной техники для выполнения и оформления конструкторских документов дает ощутимый результат, если используются компьютеры типа IBM PC/AT 386, 486, оснащенные соответствующим графическим пакетом прикладных программ (AutoCAD, CADkey, Cherry и др.).

Для составления программ, расширяющих графические возможности указанных пакетов, а также для выполнения и редактирования текстовых документов необходим текстовый редактор (Norton (встроенный), IBM, Lexicon, ChiWriter и др.).

Базы данных весьма целесообразно создавать с использованием пакетов dBASE-III plus FoxBASE и др.

Ввод информации осуществляется с клавиатуры и при помощи манипуляторов типов «мышь», «джойстик», «планшет».

Для вывода готового материала служат графопостроитель (плоттер) и печатающее устройство (принтер).

Наличие указанных аппаратных средств и графических пакетов дает возможность конструктору почти полностью отказаться от ручного выполнения документации. Все виды чертежей, схем и других

конструкторских документов могут быть получены на экране дисплея и размножены в нужном количестве бумажных копий. Использование компьютера не только ускоряет выполнение чертежных операций и повышает их точность, но и позволяет выполнять такие действия, которые невозможны при ручном черчении.

Среди графических пакетов, предназначенных для персональных ЭВМ, наиболее популярным является AutoCAD.

Работа оператора в системе AutoCAD начинается с главного меню:

Main menu (главное меню)

0. Exit AutoCAD (выход из автокада)

1. Begin a NEW drawing (новый чертеж)

2. Edit an EXISTING drawing (существующий чертеж)

3. Plot a drawing (плоттер)

4. Printer Plot a drawing (принтер)

5. Configure AutoCAD (настройка автокада)

6. File Utilities (файлы)

7. Compile shape/font description file (компиляция файлов)

8. Convert old drawing file (обновление чертежей)

Enter selection (выбор):

Если Вы выбираете пункт 1 или 2 из главного меню, то на экране появляется надпись:

Enter NAME of drawing (имя чертежа):

После введения с клавиатуры имени чертежа AutoCAD приглашает Вас к созданию нового чертежа или редактированию уже существующего.

Если Вы начинаете новый чертеж, то на экране появляется то, что изображено на рис. 12.5. Если Вы хотите исправить или дополнить существующий чертеж, то изображение дополняется нужным чертежом, расположенным в поле черчения.

Выполнение чертежных операций производится путем выбора необходимой операции из экранного меню и назначения параметров соответствующей геометрической фигуры. Выбор осуществляется

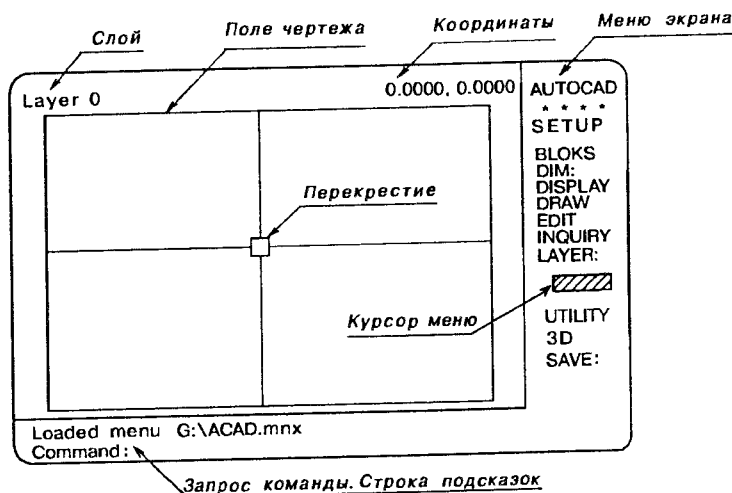


Рис. 12.5. Экран дисплея в графическом редакторе AutoCAD

перемещением курсора меню с клавиатуры или «мышью», а параметры вводятся в зону команд после появления соответствующих подсказок (см. рис. 12.5).

Выбор операции DRAW (черчение) открывает доступ к построению геометрических фигур: отрезков прямых (LINE), окружностей (CIRCLE), дуг (ARC), эллипса (ELLIPS), многоугольников (POLYGON), ломаных линий (PLINE) и т.д. Можно рисовать от руки (SKETCH), выполнять штриховку (HATCH) и писать текст (TEXT). Каждая из этих геометрических фигур носит название примитива.

Непосредственно черчение осуществляется следующим образом. Вначале выбирается нужная фигура для построения, а затем вводятся параметры этой фигуры. Например, если нужно построить отрезок прямой линии, то курсором следует выбрать команду LINE и после этого указать граничные точки отрезка. Координаты точек можно ввести с клавиатуры или указать перемещением перекрестия на экране. В результате на экране появляется изображение нужного отрезка.

Для изображения окружности нужно задать координаты ее центра и радиус (диаметр) или три точки, через которые должна пройти требуемая окружность. Аналогичные действия следует выполнить для построения других фигур.

Изображение трехмерных объектов, пространственных линий, геометрических тел, поверхностей можно выполнить, используя опцию 3 D.

Опция EDIT (редактирование) осуществляет операции с фрагментами чертежа: перенос (MOVE), копирование (COPY), вращение

(ROTATE), зеркальное отражение (MIRROR) и др. Сюда же входит стирание фрагментов (ERASE). Если необходимо восстановить нечаянно стертое изображение, то следует использовать специально предусмотренную для таких случаев команду (OOPS).

Нанесение размеров с автоматической прорисовкой стрелок и вычерчиванием размерных и выносных линий осуществляется опцией DIM.

Формировать отдельные части чертежа в виде блоков и вставлять их в требуемую точку чертежа позволяет опция BLOCKS (блоки).

Установка пределов чертежа, просмотр отдельных фрагментов в измененном масштабе, выбор системы координат, изображение аксонометрических проекций осуществляются при выборе опции DISPLAY (дисплей).

Опция LAYER (слой) предназначена для наложения нескольких изображений (слоев) один на другой. При этом каждый слой может быть выполнен линиями заданного начертания и цвета.

Команды, объединенные в опцию INQUIRY, позволяют определять площадь любой плоской фигуры и ее периметр (ARREA), отображать на экране координаты заданной точки (ID), находить расстояние между двумя точками (DIST), получать информацию из базы данных по каждому входящему в состав чертежа примитиву (BDLIST) или по всему чертежу в целом (STATUS).

Настройка и служебные функции производятся при помощи опций SETUP и UTILITY, опция SAVE предохраняет файл чертежа от случайных повреждений.

На рис. 12.6 приведен чертеж микросхемы, выполненный в графическом пакете AutoCAD на

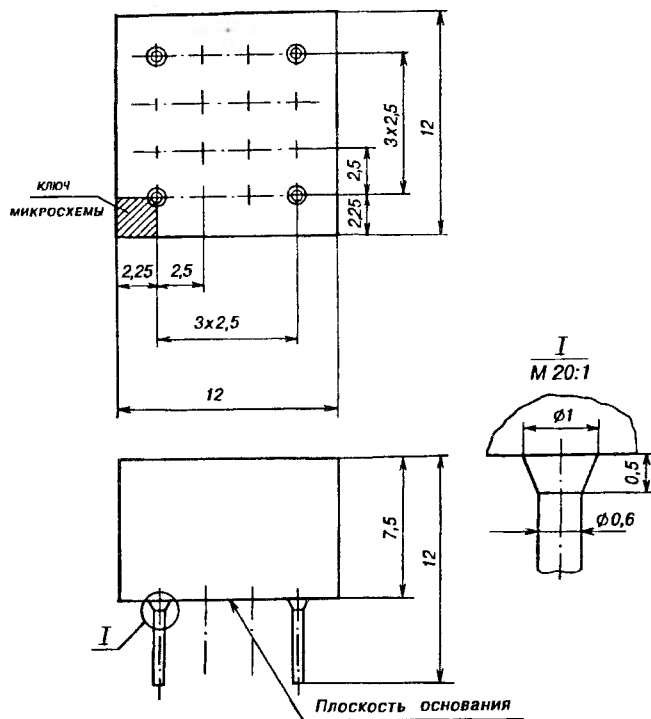


Рис. 12.6. Чертеж микросхемы, выполненный в графическом пакете AutoCAD

персональной ЭВМ и задокументированный на плоттере.

Графический редактор AutoCAD не требует от оператора специальных знаний по программированию во всех случаях, пока для выполнения чертежей достаточно команд экранного меню. Программирование необходимо в том случае, если нужно расширить возможности существующей версии пакета или приспособить ее для выполнения каких-то специальных задач. Для программирования в пакете AutoCAD разработан язык AutoLISP, который является версией алгоритмического языка высокого уровня LISP.

AutoLISP используется также для выполнения математических расчетов в процессе конструирования. Для этого не нужно выходить из графического редактора. На запрос «Command» следует написать необходимое математическое действие и получить ответ. Например, чтобы перемножить два числа a и b , следует написать: $(* a b)$. После этого AutoLISP дает ответ. В случае ошибочной записи AutoLISP выдает соответствующее сообщение об ошибке.

Нужно заметить, что AutoCAD постоянно совершенствуется, появляются новые версии, осуществляется перевод с английского на другие языки, в том числе и на русский.

12.4. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

ЧЕРТЕЖИ ЖГУТОВ, КАБЕЛЕЙ, ПРОВОДОВ

Жгутом называется изделие состоящее из двух и более изолированных проводников (проводов, кабелей), скрепляемых в пучок сплетением, связыванием или каким-либо другим способом, и других составных частей (соединительных устройств, наконечников и т.п.). Кабель представляет собой изделие, состоящее из одного кабеля или провода, в виде детали и каких-либо других составных частей (соединительных устройств). Таким образом, жгут и кабель следует рассматривать как сборочную единицу и выполнять сборочный чертеж (ГОСТ 2.109-73) и спецификацию (ГОСТ 2.108-68). Особенности выполнения чертежей жгутов отражены в ГОСТ 2.414-75.

Направление ответвлений, расположение жгута и его элементов на поле чертежа относительно основной надписи должны соответствовать фактическому их положению в готовом жгуте. При выполнении чертежа жгута изображают: проводники и их соединения, запасные проводники, переходные контакты, соединительные устройства (штепсельные разъемы, наконечники), маркировочные бирки, размеры длин всех участков жгута с указанием допустимых отклонений, указания о присоединении проводников.

Ленту, нитки и другой подобный материал, которым должен быть обмотан жгут или кабель, на чертеже не изображают. Данные об этих материалах указывают в спецификации, а об их применении — в технических требованиях чертежа.

Чертеж жгута может быть выполнен упрощенно

или условно. Упрощенное выполнение чертежа предполагает изображение всех составных частей внешними очертаниями. На чертеже жгута, выполненном условно, проводники показывают одной линией, экранированные проводники — штриховой линией, штепсельные разъемы, наконечники — прямоугольником.

На чертеже жгута (кабеля) должны быть помещены сведения о присоединении проводников. Их можно приводить в таблице, помещаемой около изображения соединительного устройства или на свободном поле чертежа. В таблице указывают контакт разъема, номер проводника или адрес присоединения вторых концов проводов.

Для жгутов и кабелей радиоэлектронной промышленности сведения о присоединениях проводов удобно указывать на схеме соединений, выполненной на поле чертежа. Оформление схемы соединений должно соответствовать требованиям ГОСТ 2.701-84 и ГОСТ 2.702-75, при этом должны быть изображены все незадействованные контакты, на которые заведены запасные провода.

Пример выполнения сборочного чертежа жгута приведен на рис. 12.7. Жгут изображен условно, кабельные вилка и розетка — упрощенно — (по ОСТ4. ГО.000.047). Сведения о соединении проводников содержатся в схеме, размещенной на поле чертежа. Технические требования поясняют технологию изготовления жгута. Связь сборочного чертежа со спецификацией осуществляется через позиционные обозначения.

ЧЕРТЕЖИ ИЗДЕЛИЙ С ОБМОТКАМИ И МАГНИТОПРОВОДАМИ

К изделиям с обмотками и магнитопроводами относятся: электрические машины, трансформаторы, приборы и аппараты. Чертежи таких изделий выполняют в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД к чертежам деталей и сборочным чертежам. Особенности выполнения отражены в ГОСТ 2.415-68 и ГОСТ 2.416-68. Чертеж изделия с обмотками, как правило, является сборочным чертежом и в общем случае должен содержать: изображение изделия, дающее представление о составе, расположении и взаимодействии его составных частей; схему соединений обмоток; таблицу обмоточных данных; габаритные, присоединительные и исполнительные размеры; номера позиций составных частей; технические требования к изготовлению и контролю изделия. Основным конструкторским документом чертежа с обмотками и магнитопроводами является спецификация, выполненная в соответствии с требованиями ГОСТ 2.108-68.

При изображении изделий типа роторов, статоров и индукторов электрических машин в продольном разрезе, как правило, показывают верхнюю половину предмета. Нижняя половина показывается упрощенно без разреза (рис. 12.8). ГОСТ 2.415-68 устанавливает правила изображения различных видов обмоток ротора и статора в продольном и поперечном разрезах. В поперечном разрезе многовитковую обмотку заштриховывают «в клетку», при

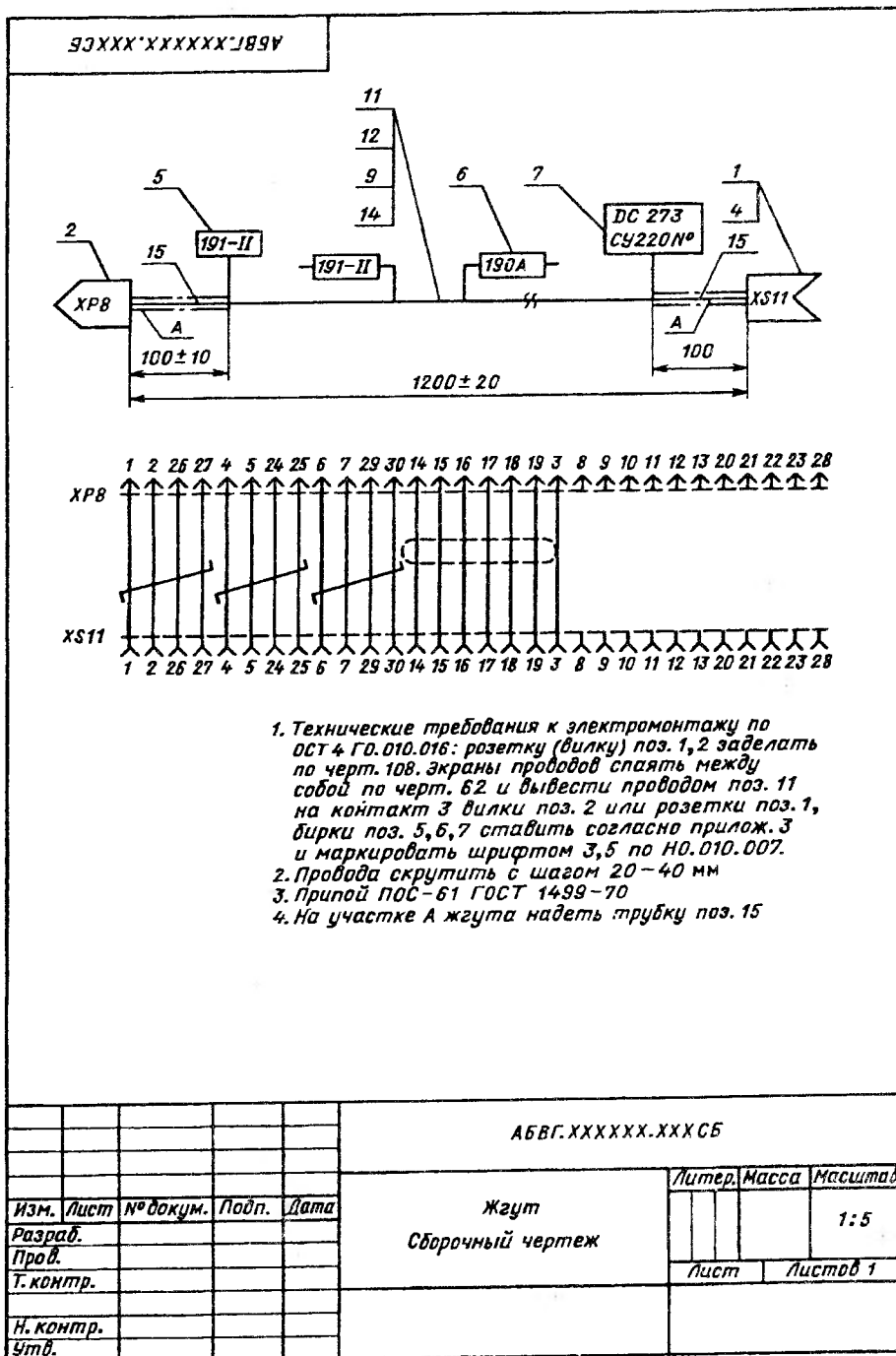


Рис. 12.7. Сборочный чертеж жгута

этом направление штриховки должно быть параллельно оси паза (для статоров и роторов) или оси каркаса катушки (для трансформаторов и дросселей).

Изоляцию однослойную и многослойную в разрезах и сечениях заштриховывают как неметаллический материал, при толщине менее 2 мм — зачерняют. Магнитопроводы в поперечных разрезах штрихуют в направлении расположения листов и лент. При отсутствии разрезов магнитопроводов допускается проводить несколько штриховых линий, указывая направление листов.

Если секущая плоскость проходит через ось сердечника ротора или статора, то независимо от расположения пазов разрез показывают по зубу (см. рис. 12.8). Часть материалов, используемых при изготовлении изделия с обмотками, может быть не показана непосредственно на изображении изделия, например изоляция, бандаж и др. Сведения об этих материалах должны быть записаны в соответствующих разделах спецификации, а применение отражено в таблице обмоточных данных и технических требованиях чертежа. В технических требованиях или в таблице обмоточных данных помещают также указания о количестве слоев и витков обмотки, изоляции и бандажа и данные об их расположении. Как правило, на сборочном чертеже изделия с обмотками помещают схему обмотки (см. рис. 12.8). Начало и конец обмотки обозначают точкой или буквами Н и К соответственно.

ЧЕРТЕЖИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Конструкторская документация на печатные платы и блоки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73, ГОСТ 2.417-78 и действующими нормативно-техническими документами. Чертеж односторонней или двухсторонней печатной платы классифицируется как чертеж детали. Чертеж печатной платы должен содержать все сведения, необходимые для ее изготовления и контроля: изображение печатной платы со стороны печатного монтажа; размеры, предельные отклонения и шероховатость поверхностей печатной платы и всех ее элементов (отверстий, проводников), а также расстояния между ними; необходимые технические требования; сведения о материале.

Размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными 2,5 при длине до 100 мм; 5 при длине до 350 мм; 20 при длине более 350 мм. Максимальный размер любой из сторон печатной платы не должен превышать 470 мм. Соотношение линейных размеров сторон печатной платы должно быть не более 3:1 и выбирается из ряда 1:1; 1:2; 2:3; 2:5. Толщину плат определяют исходя из механических требований, предъявляемых к конструкции печатного блока, с учетом метода изготовления. Рекомендуются платы толщиной 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Чертежи печатных плат выполняют в натуральную величину или с увеличением 2:1; 4:1; 5:1; 10:1.

Разработку чертежа печатной платы начинают с нанесения координатной сетки. За основной шаг

прямоугольной координатной сетки по ГОСТ 10317-79 принимается 2,5 мм. Для малогабаритной аппаратуры и в технически обоснованных случаях допускается применять дополнительные шаги 1,25 и 0,5 мм.

Центры всех отверстий на печатной плате должны располагаться в узлах координатной сетки. Диаметры монтажных и переходных металлизированных отверстий выбирают из ряда (0,2); 0,4; (0,5); 0,6; (0,7); 0,8; (0,9); 1,0; (1,2); 1,3; 1,5; 1,8; 2,0; 2,2; (2,4); (2,6); (2,8); (3,0). Диаметры, не взятые в скобки, являются предпочтительными.

Габаритные размеры печатной платы, диаметры и координаты отверстий, контактных площадок и их относительное расположение показывают на чертеже одним из следующих способов:

- а) в соответствии с требованиями ГОСТ 2.307-68 с помощью размерных и выносных линий;
- б) нанесением координатной сетки;
- в) комбинированным способом при помощи размерных и выносных линий и координатной сетки;
- г) с помощью таблицы координат.

На рис. 12.9 приведен пример выполнения чертежа печатной платы с комбинированным способом простановки размеров — при помощи размерных и выносных линий и координатной сетки. Линии координатной сетки нанесены через одну, и поэтому приведена соответствующая запись в технических требованиях чертежа. Отверстия изображены условно. На поле чертежа выполнена таблица отверстий.

Все недостающие данные относительно печатного монтажа указаны в технических требованиях чертежа.

ЧЕРТЕЖИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМОНТАЖА

Такие чертежи относятся к сборочным, и поэтому содержат как минимум два документа — спецификацию и сборочный чертеж. В электротехнике значительная группа изделий изготавливается с применением электромонтажа, например электро- и радиоприборы, электроустановки и т.д. Конструкторскую документацию на такие изделия выполняют с учетом требований ГОСТ 2.413-72. В состав чертежа с применением электромонтажа, как правило, входят элементы электрической принципиальной схемы или схемы соединений: трансформаторы, резисторы, конденсаторы и др. Таким элементам должны быть присвоены буквенно-цифровые позиционные обозначения по соответствующей схеме.

В зависимости от объема, сложности и характера производства чертежи изделий с применением электромонтажа выполняют одним из следующих вариантов.

Вариант А. Механическая сборка и электро-монтаж изделия производится по одному и тому же чертежу. В этом случае разрабатывают сборочный чертеж с учетом требований ГОСТ 2.109-73 и ГОСТ 2.413-72 и спецификацию с учетом ГОСТ 2.108-68 и ГОСТ 2. 413-72.

Вариант Б. Электромонтаж изделия производят по самостоятельному чертежу. При этом разрабатывают четыре конструкторских документа: сборочный чертеж и спецификацию для механической сборки, учитывая требования ГОСТ 2.109-73 и ГОСТ 2.108-68; сборочный чертеж и спецификацию для электромонтажа с учетом ГОСТ 2.413-72.

Вариант В. Электромонтаж изделия производят по электромонтажному чертежу (шифр МЭ). При этом разрабатывают три конструкторских документа: сборочный чертеж со спецификацией для механической сборки и электромонтажный чертеж (МЭ) по ГОСТ 2.413-72. Электромонтажный чертеж выполняют в том же масштабе, что и сборочный чертеж изделия. При необходимости отдельные изделия допускается выполнять в другом масштабе. Все изделия, устанавливаемые до электромонтажа, изображают тонкими линиями упрощенно — в виде контурных очертаний без графических подробностей; составные части, устанавливаемые при электромонтаже, и места присоединения проводников — сплошными основными линиями. Для удобства изображения составных частей допускается разворачивать стенки и совмещать с плоскостью чертежа, поворачивать составные части, сопровождая такие изображения соответствующими надписями. Пример выполнения электромонтажного чертежа приведен на рис. 12.10.

Вариант Г. Электромонтаж изделия производят по другим документам. При этом разрабатывают два конструкторских документа: сборочный чертеж и спецификацию для механической сборки. В технических требованиях сборочного чертежа указывают документ, по которому производят электромонтаж: схему электрическую принципиальную (ЭЗ), схему электрическую соединения (Э4) или таблицу соединений (ТБ) в зависимости от характера производства. Составные части, устанавливаемые при электромонтаже, записывают в спецификацию сборочного чертежа в дополнительных разделах.

ЧЕРТЕЖИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Главной особенностью конструирования интегральных микросхем является тесная связь конструктивных решений с технологией изготовления элементов микросхем. Интегральная технология позволяет за одну непрерывную операцию получить одновременно все элементы функционального узла или схемы в единой конструкции. При такой технологии отсутствуют сборочные операции, процесс образования элементов схемы совмещен с процессом образования самой конструкции. При изготовлении пленочных интегральных микросхем электрорадиоэлементы получают на подложке в виде пленок полупроводников, диэлектриков, различных металлов и их оксидов, последовательно наносимых одна на другую. Методами пленочной технологии изготавливают резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, соединительные проводники и контактные площадки. Миниатюрные

трансформаторы, транзисторы, диоды являются навесными элементами, так как их трудно изготовить методами пленочной технологии. Пленочные микросхемы с навесными элементами называют гибридными.

При разработке конструкции интегральных микросхем исходят из общих требований к конструкторским документам и учитывают особенности интегральной технологии. Одним из важных этапов работы является разработка топологической структуры пленочной микросхемы.

Исходными данными для разработки топологии микросхемы являются электрическая принципиальная схема с перечнем элементов, техническое задание, технологические ограничения. Топологический чертеж выполняют в масштабе 10:1 или 20:1. При разработке чертежа необходимо учитывать методы получения элементов схемы и очередность нанесения слоев. При выполнении топологических чертежей используют условные обозначения типов слоев. Резистивный слой изображают площадками с точечным фоном; проводники, контактные площадки, обкладки конденсаторов заштриховывают тонкими линиями с углом наклона к контуру чертежа 45°, различая их между собой направлением и частотой штриховки. Диэлектрический слой ограничивают штрихпунктирной линией, а защитный — штриховой по ГОСТ 2.306-68.

На рис. 12.11 приведен пример выполнения топологического чертежа платы гибридной тонкопленочной микросхемы. На топологическом чертеже изображена плата после нанесения последнего слоя. Условные обозначения слоев и их технические характеристики помещены в табл. 1 на поле чертежа. Внешним контактным площадкам присвоены порядковые номера, которые проставлены условно по часовой стрелке, начиная с нижней левой площадки; внутренним площадкам также присвоены номера. Пассивные пленочные элементы обозначены в соответствии с электрической принципиальной схемой. Местоположение навесных элементов (микротранзисторов) показано метками в виде уголка на резистивном слое.

По топологическому чертежу платы разрабатывают чертежи слоев микросхемы по элементам (резисторы, проводники, контактные площадки, обкладки конденсаторов, диэлектрики и т.д.).

На плату интегральной микросхемы устанавливают навесные элементы и компоненты в соответствии с принципиальной схемой. Такие платы оформляют как сборочные чертежи в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73. Плата микросхемы должна быть установлена в корпус, и для этого разрабатывается сборочный чертеж тонкопленочной микросхемы (рис. 12.12). Чертеж включает изображение микросхемы, размеры исполнительные и справочные, технические требования.

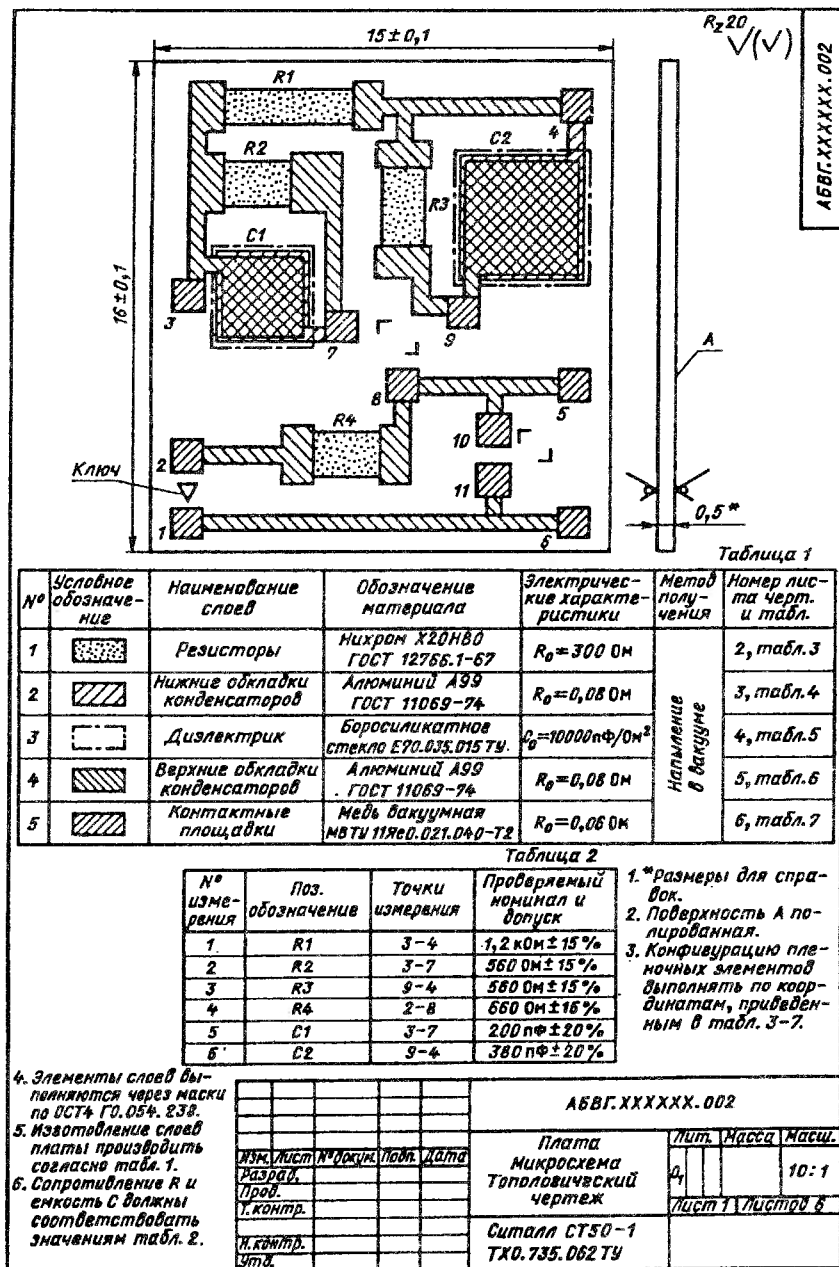
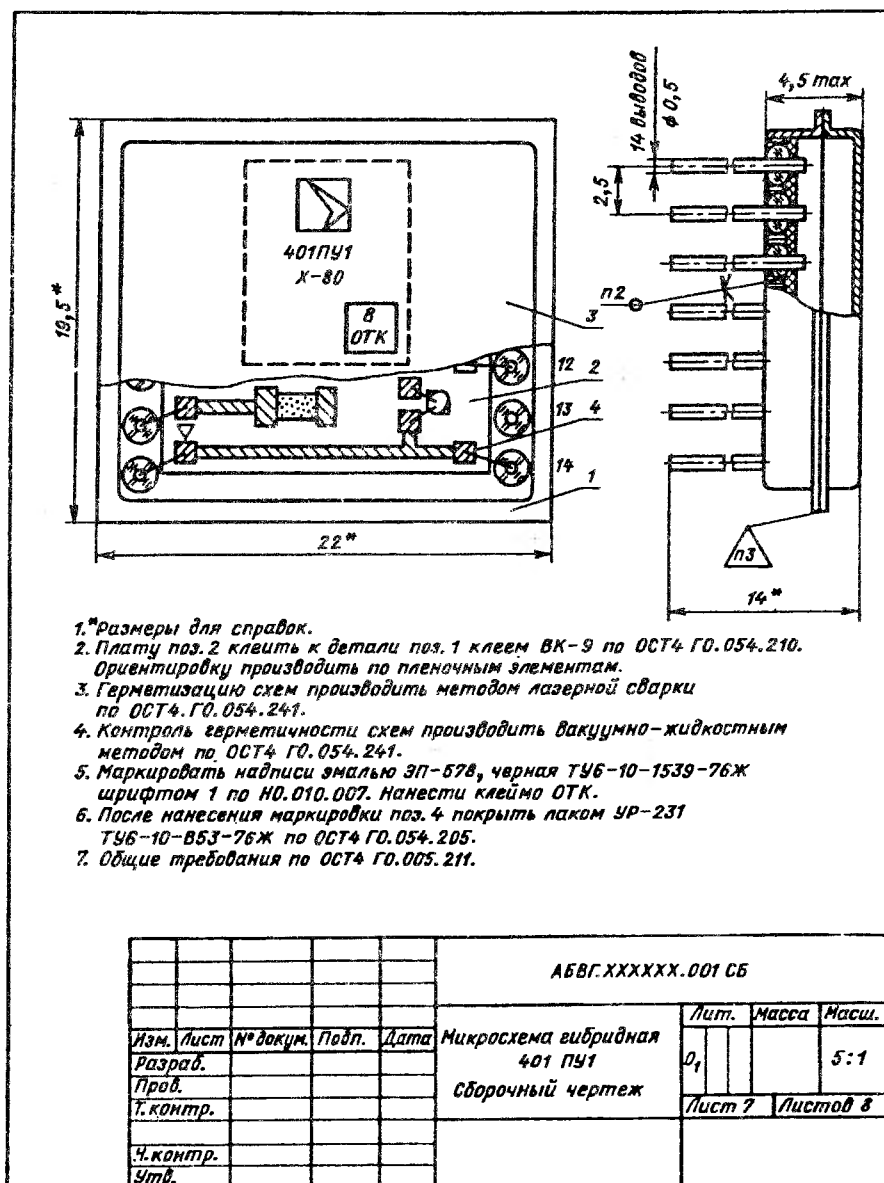


Рис. 12.11. Топологический чертеж микросхемы



12.5. ОФОРМЛЕНИЕ СХЕМ

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЕ СХЕМ

Схема — конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Классификацию схем по видам и типам устанавливает ГОСТ 2.701-84. Виды схем определяются в зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия, и обозначаются буквами русского алфавита. Различают десять видов схем: электрическая — Э, гидравлическая — Г, пневматическая — П, газовая — Х, кинематическая — К, вакуумная — В, оптическая — Л, энергетическая — Р, деления — Е, комбинированная — С. Схемы в зависимости от назначения подразделяют на типы и обозначают арабскими цифрами. Установлено восемь типов схем: структурная — 1, функциональная — 2, принципиальная (полная) — 3; соединений (монтажная) — 4, подключения — 5, общая — 6, расположения — 7, объединенная — 0. На объединенной схеме совмещаются различные типы схем одного вида, например схема электрическая соединений и подключения.

Наименование и код схемы определяются ее видом и типом. Код схемы должен состоять из буквенной части, определяющей вид схемы, и цифровой части, определяющей тип схемы. Например схема электрическая принципиальная — Э3, схема гидравлическая соединений — Г4 и т.д. Наименование комбинированной схемы определяется видами схем, входящими в ее состав, и соответствующим типом, например схема электрогидравлическая принципиальная — С3. Наименование объединенной схемы определяется видом схемы и типами схем, входящими в ее состав, например схема электрическая соединений и подключения — Э0. При выполнении комбинированных и объединенных схем должны соблюдаться правила, установленные для соответствующих видов и типов схем.

В технических документах, разрабатываемых при проектировании, эксплуатации и исследовании электротехнических устройств, применяют все типы схем, указанные выше, при этом на стадиях эскизного и технического проектирования разрабатывают структурные и функциональные схемы, на стадии рабочего проектирования — принципиальные, соединений, подключения, общие и расположения. Общее количество схем, входящих в комплект конструкторской документации на изделие, выбирается минимальным, но в совокупности они должны содержать сведения в объеме, достаточном для проектирования, эксплуатации, контроля и ремонта изделия. Между схемами одного комплекта осуществляется однозначная связь при помощи буквенно-цифровых позиционных обозначений. Такая связь необходима для быстрого отыскания одних и тех же элементов или устройств, входящих в схемы различного типа.

Общие правила выполнения схем устанавливаются ГОСТ 2.701-84 и ГОСТ 2.702-75. Схемы выполняют без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных ча-

стей не учитывается или учитывается приближенно. Электрические элементы и устройства на схеме изображают в состоянии, соответствующем обесточенному. Элементы и устройства, которые приводятся в действие механически, изображают в нулевом или отключенном положении. При отклонении от этого правила на поле схемы необходимо давать соответствующие указания.

СХЕМЫ СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи и служит для общего ознакомления с изделием. Составные функциональные части изделия изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений. Все необходимые данные об элементах записывают, как правило, около графических обозначений. Допускается помещать эти данные в таблице, размещаемой на поле схемы. В этом случае над изображением элемента или справа от него проставляют порядковые номера сверху вниз в направлении слева направо. На линиях взаимосвязи рекомендуются стрелками указывать направление хода процессов, происходящих в изделии. Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы и таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках (значения токов, напряжений, формы и величины импульсов, математические зависимости и т.п.).

Функциональные схемы разъясняют определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Этими схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле, ремонте. При разработке функциональных схем используют те же правила, что и для структурных схем, за исключением позиционных обозначений элементов. Порядковые номера элементам и устройствам на функциональных схемах не присваивают. Кроме данных об элементах и устройствах (наименование, тип) на функциональных схемах необходимо указывать буквенно-цифровые позиционные обозначения, присвоенные им на принципиальной схеме. При выполнении функциональных схем рекомендуется пользоваться правилами выполнения принципиальных схем в части способов построения схемы.

СХЕМЫ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ

Схема электрическая принципиальная определяет полный состав элементов изделия и связи между ними и дает детальное представление о принципе работы изделия. Принципиальная схема служит основанием для разработки схем соединения, подключения, общих. На принципиальной схеме изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления заданных электрических процессов, все связи между ними, элементы подключения (разъемы, зажимы) входных и выходных цепей, а также их характери-

стики. Элементы на принципиальной схеме изображают в виде условных графических обозначений согласно соответствующими ГОСТ ЕСКД.

Устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, изображают в виде прямоугольников или условных графических обозначений. Допускается в прямоугольники, изображающие устройства, помещать схемы структурные или функциональные либо полностью или частично повторять схемы принципиальные этих устройств.

Каждому устройству или элементу, входящему в схему, должно быть присвоено буквенно-цифровое позиционное обозначение согласно ГОСТ 2.710-81. Буквенно-цифровые обозначения следует присваивать элементам в соответствии с последовательностью расположения их на схеме сверху вниз в направлении слева направо. Порядковые номера присваивают элементам, начиная с единицы, в пределах группы элементов, имеющих на схеме одинаковые буквенные обозначения, например *R1*, *R2*, *R3* и т.д., *C1*, *C2*, *C3* и т.д. Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условным графическим обозначением элемента с правой стороны или над ним.

Элементы и устройства на схеме изображают разнесенным или совмещенным способом. Разнесенным способом выполняют схемы телефонии и автоматики, электрооборудования т.е. те схемы, где много контакторов, реле и различных контактов. При выполнении таких схем рекомендуется пользоваться строчным способом, располагая условные графические обозначения элементов последовательно друг за другом, а отдельные цепи — одну под другой. В результате образуются параллельные строки, которые следует нумеровать арабскими цифрами.

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей (частоту, напряжение, ток и т.п.), а также адреса их внешних подключений. Эти данные рекомендуется записывать в таблицы, заменяющие условные графические обозначения элементов, например разъема (рис. 12.13). Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен условного графического обозначения которого она помещена.

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы, изображенные на схеме. Данные об элементах (наименование, тип, документ на основании, которого элемент применен) записывают в таблицу перечня элементов (см. рис. 12.13). Перечень элементов заполняют сверху вниз в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. При этом записи одинаковых по наименованию элементов рекомендуется объединять в группы, выполнять общий заголовок, например «Резисторы», и записывать в графе «Наименование» только тип и документ, на основании которого этот элемент применен. В пределах одного наименования элементы располагают по возрастанию порядковых номеров. Элементы одного типа с одинаковыми параметрами, имеющие на схеме последовательные порядковые номера, реко-

мендуется записывать в перечень в одну строку, при этом в графе «Поз. обозначение» указывать позиционные обозначения всех элементов, например 1... 3, а в графе «Кол.» — общее количество таких элементов. Наименование элементов в таких случаях записывают в единственном числе. Между группами элементов, а также между отдельными элементами рекомендуется оставлять незаполненные резервные строчки.

Если в изделие входят несколько одинаковых устройств, не имеющих самостоятельных принципиальных схем или одинаковых функциональных групп, то на схеме изделия допускается не повторять схемы этих устройств. При этом устройство или функциональную группу изображают в виде прямоугольника, а схему такого устройства изображают внутри одного из прямоугольников (см. рис. 12.13) или помещают на поле схемы с соответствующей надписью.

СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ И ПОДКЛЮЧЕНИЯ

Схема соединений показывает соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединения и ввода (зажимы, разъемы). Схематическими соединениями пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при наладке, контроле, ремонте и эксплуатации изделий.

На схеме соединений должны быть изображены все устройства и элементы, входящие в состав изделия, их входные и выходные элементы, а также соединения между ними.

Элементы и устройства на схеме изображают в виде прямоугольников, внешних очертаний или условных графических обозначений. На схеме около графических обозначений элементов и устройств указывают позиционные обозначения, присвоенные им на электрической принципиальной схеме. Расположение графических обозначений элементов и устройств на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению их в изделии. Входные и выходные элементы изображают условными графическими обозначениями или оформляют в виде таблицы (рис. 12.14). Допускается применять условные графические обозначения разъемов, не показывающие отдельные контакты, при этом около разъема помещают таблицы с указанием подключения контактов или приводят эти сведения в таблице соединений на поле схемы.

Схема подключения показывает внешние подключения изделия. На схеме подключения должны быть изображены: изделие (в виде прямоугольника), его входные и выходные элементы (в виде условных графических обозначений) и подводимые к ним концы проводов и кабелей внешнего монтажа (см. рис. 12.14). Размещение изображений входных и выходных элементов должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии. Правила выполнения схем подключения те же, что и схем соединений.

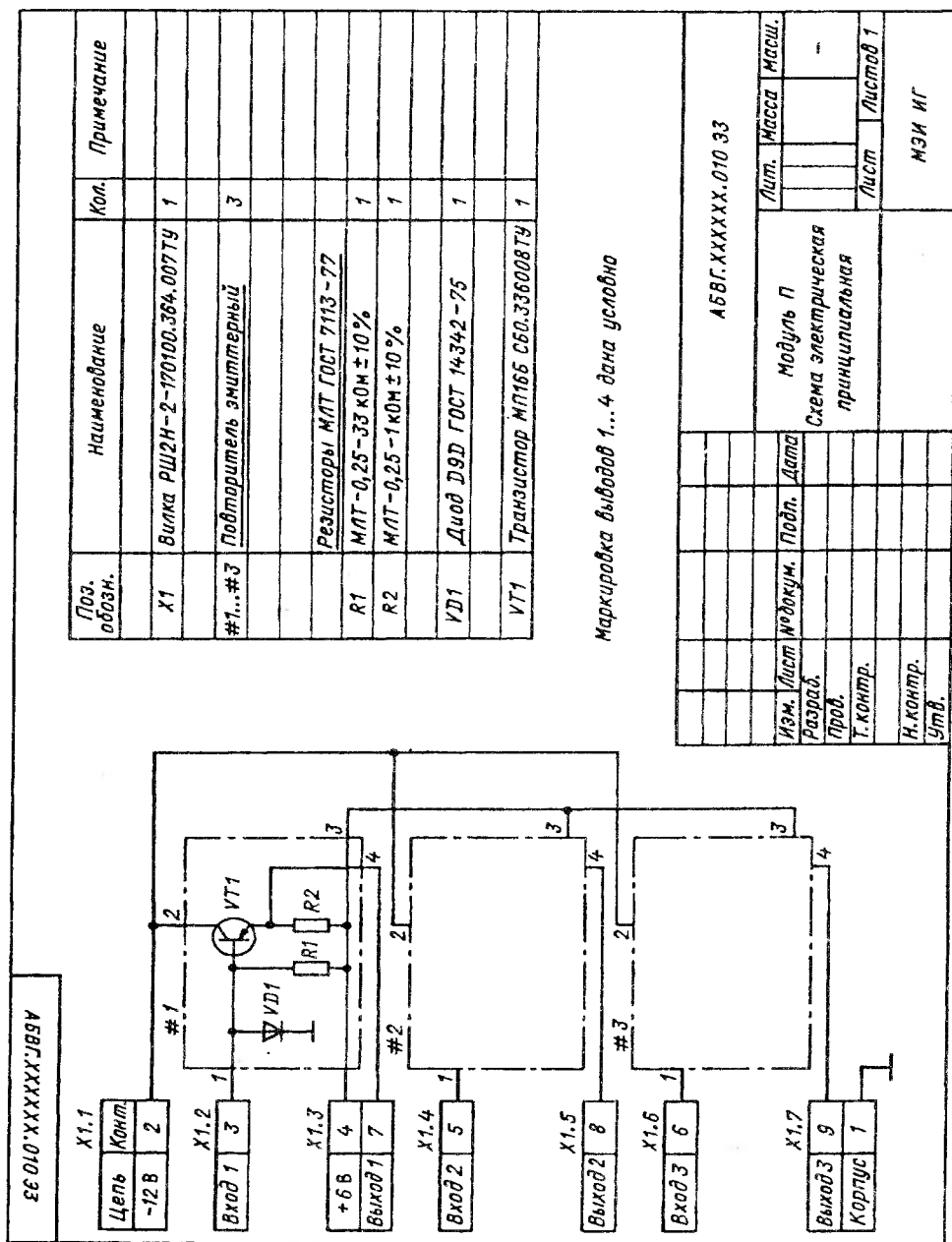


Рис. 12.13. Схема электрическая принципиальная

СХЕМЫ ОБЩИЕ И РАСПОЛОЖЕНИЯ

Общая схема определяет составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. На общей схеме должны быть изображены устройства и элементы, входящие в комплекс, в виде прямоугольников, входные и выходные элементы — в виде условных графических обозначений, а также провода, жгуты и кабели, соединяющие эти устройства и элементы. Размещение графических обозначений устройств на схеме, а также входных и выходных элементов внутри устройств должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии. При изображении входных и выходных элементов (соединителей) допускается указывать количество их контактов внутри изображения разъема. Провода, жгуты и кабели изображают и обозначают по правилам для схем соединений.

Схема расположения показывает относительное расположение составных частей изделия, а также проводов, жгутов, кабелей. Составные части изделия изображают в виде внешних очертаний или условных графических обозначений; провода, жгуты, кабели — в виде отдельных линий или внешних очертаний. Расположение графических обозначений составных частей изделия на схеме должно давать правильное представление об их действительном размещении в конструкции, помещении. При выполнении схем расположения применяют различные способы постро-

ения (аксонометрия, план, условная развертка, разрез конструкции). Схема расположения может сопровождаться перечнем элементов, если затруднено нанесение данных о составных частях изделия на поле схемы.

СХЕМЫ ОБМОТОК И ИЗДЕЛИЙ С ОБМОТКАМИ

Для обмоток и изделий с обмотками выполняют схемы: структурные, принципиальные, соединений, подключения, расположения. При этом пользуются правилами ГОСТ 2.702-75. При выполнении схем соединений и расположения, кроме того, учитывают требования ГОСТ 2.705-70. На схеме соединений кроме электрических элементов допускается изображать части магнитопровода и отдельные элементы конструкции, указывать направление тока (рис. 12.15). При одинаковых соединениях элементов в многофазных изделиях (например, катушек в обмотке трехфазного трансформатора) на схеме допускается изображать элементы и их соединения только в одной фазе, при этом на поле схемы приводят указания о соединениях в остальных фазах. Элементы обмотки изображают в соответствии с требованиями ГОСТ 2.723-68. Для выделения различных обмоток допускается выполнять полуокружности в условном графическом обозначении разными радиусами (рис. 12.16). Дисковые катушки показывают в виде утолщенных отрезков линий.

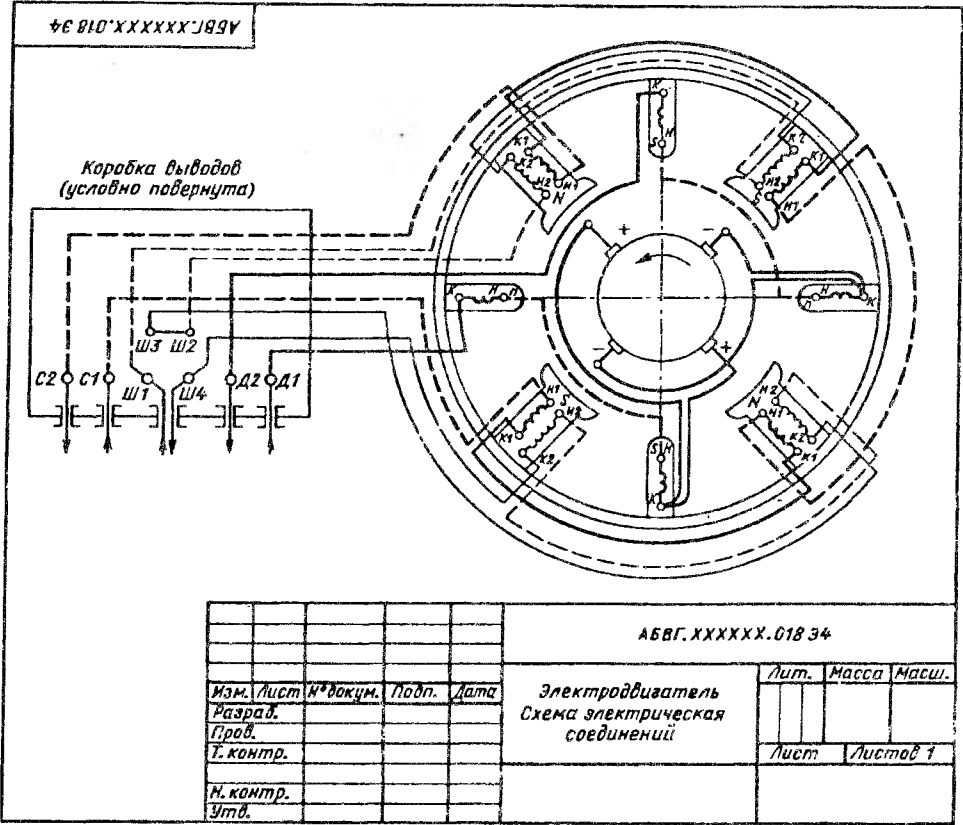


Рис. 12.15. Пример электрической схемы соединений электродвигателя (применительно к виду со стороны коллектора)

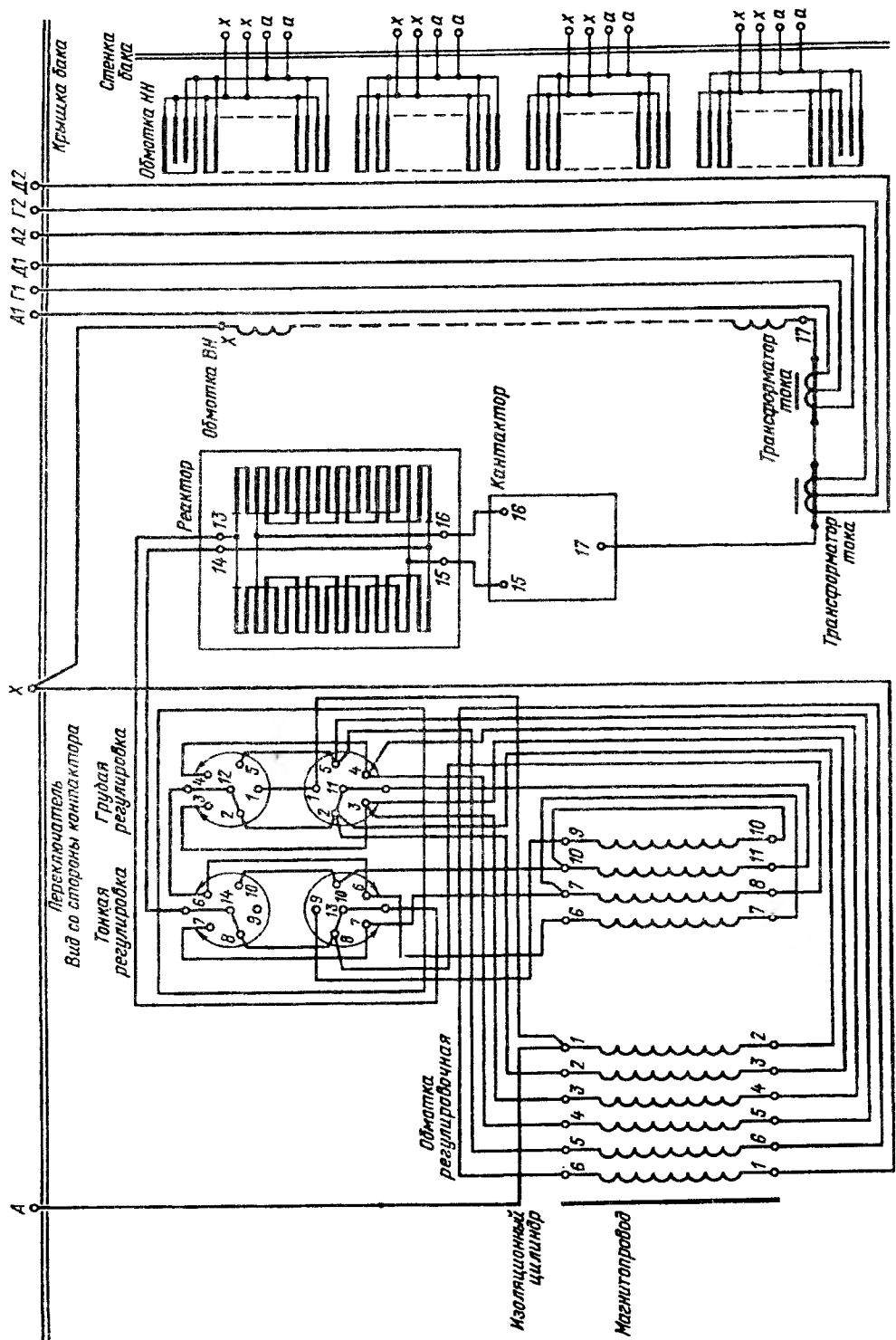


Рис. 12.16. Изображение обмоток трансформатора

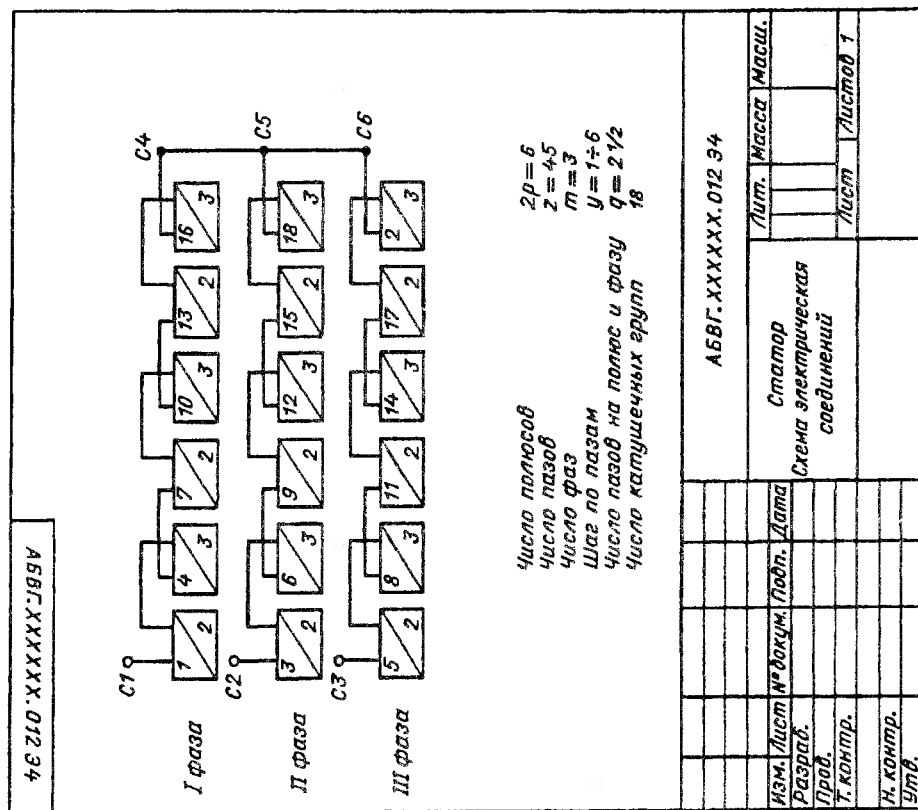


Рис. 12.18. Пример электрической схемы соединений с расположением изображения обмоток статора, определяемым удобством чтения схемы

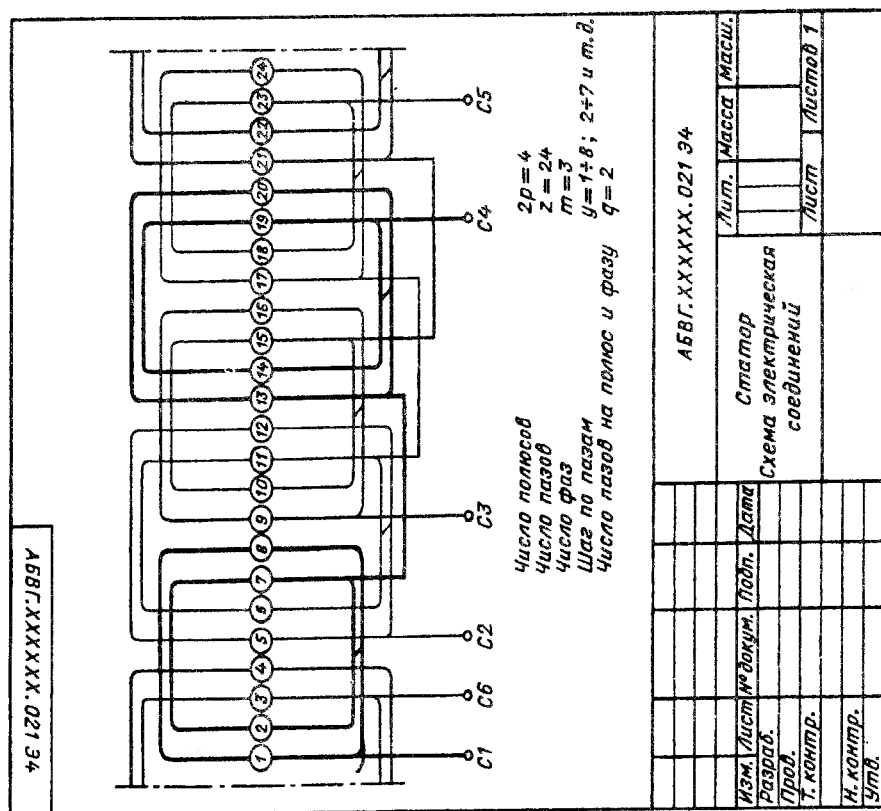


Рис. 12.17. Пример электрической схемы соединений обмоток статора (при развертке на плоскость)

При выполнении схем соединений используют сплошные основные и штриховые линии различной толщины для выделения элементов, принадлежащих к разным обмоткам (см. рис. 12.15, 12.17). Штриховыми линиями показывают элементы обмоток и соединения, расположенные со стороны, противоположной изображенному на схеме виду (рис. 12.15). Начала и концы обмоток обозначают арабскими цифрами, буквами Н (начало), К (конец) или точками, наносимыми около начала элемента обмотки. Полярность главных полюсов электрических машин обозначают буквами *N* (северный) и *S* (южный), добавочных — соответственно буквами *n* и *s*. Пазы нумеруют арабскими цифрами.

На поле схеме допускается помещать необходимые технические данные: число полюсов, число пазов на полюс и фазу, число пазов, шаг по пазам и коллектору, число фаз, число параллельных ветвей, число коллекторных пластин, вид обмотки и т.п.

Схемы соединений выполняют с расположением изображений обмотки: при развертке ее на плоскость (см. рис. 12.17); применительно к виду на изделие с определенной стороны (см. рис. 12.15); определяемым удобством чтения схемы (рис. 12.18). На рис. 12.18 элементы обмотки (катушечные группы) изображены в виде прямоугольников. Над диагональю прямоугольника указывают номер катушечной группы, под диагональю — число катушек в катушечной группе.

СХЕМЫ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Типы электрических схем для изделий цифровой вычислительной техники и правила их выполнения должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.701-84 и ГОСТ 2.702-75. При выполнении структурных схем применяют условные графические обозначения, приведенные на рис. 12.19, при выполнении функциональных схем — приведенные на рис. 12.20.

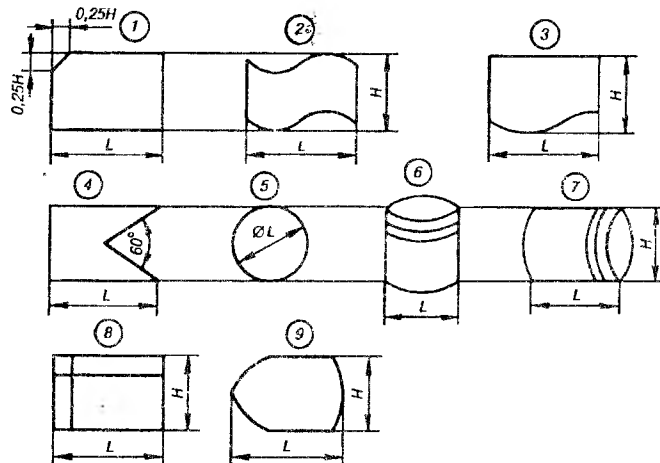


Рис. 12.19. Условные графические обозначения для структурных схем вычислительной техники: 1, 2 — устройства-носители данных: перфокарты (1), перфоленты (2); 3 — печатающие устройства; 4—7 — накопители на магнитных картах (4), магнитной ленте (5), магнитном диске (6), магнитном барабане (7); 8 — запоминающее устройство; 9 — визуальное устройство ввода-вывода

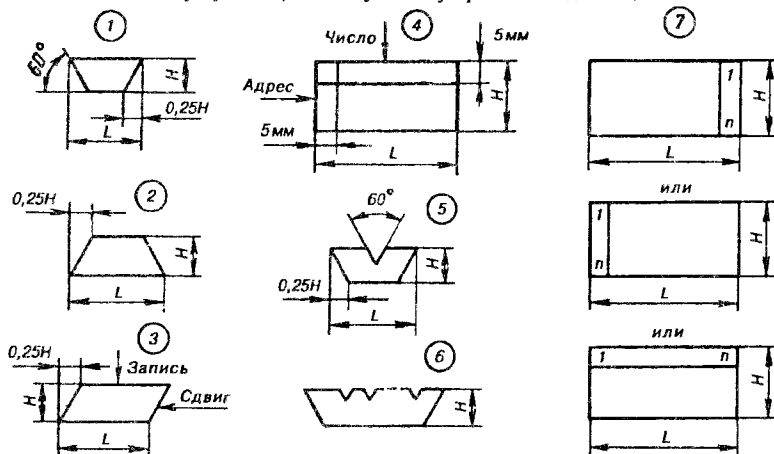


Рис. 12.20. Условные графические обозначения для функциональных схем вычислительной техники: 1 — комбинационный элемент (общее обозначение для элементов типа свертки, избирательной схемы, шифратора и др.); 2 — дешифратор; 3 — регистр сдвига; 4 — элемент памяти; 5 — сумматор двух чисел; 6 — сумматор *n* чисел; 7 — приоритетные схемы

Размер H для условных графических обозначений структурных и функциональных схем должен выбираться из ряда 10; 15 мм и далее через 5 мм. Размер $L = 1,5 H$.

12.6. ОБОЗНАЧЕНИЯ БУКВЕННО-ЦИФРОВЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

В зависимости от назначения и характера передаваемой информации устанавливаются следующие типы обозначений:

Высшего уровня:

устройство	=
функциональная группа	≠ или ≠
Конструктивное обозначение	+
Обозначение элемента	—
Обозначение электрического контакта	:
Адресное обозначение	()

Условное буквенно-цифровое обозначение записывается в виде последовательности букв, цифр и знаков в одну строку без пробелов, и их количество в обозначении не устанавливается.

Порядок записи обозначений высшего уровня и конструктивных определяется порядком вхождения, например $\neq T1=A2-R5$ означает, что резистор $R5$ входит в состав устройства $A2$, которое входит в функциональную группу $T1$. Перед обозначением устройства, функциональной группы или элемента, стоящим в начале составного обозначения, допускается не указывать классифицирующий символ, если это не приведет к неправильному пониманию обозначения, например $K1:2$ — второй контакт реле $K1$.

Буквенные коды элементов (ГОСТ 2.710-81)

Примеры видов элементов	Код
Устройство. Общее обозначение	A
Преобразователи неэлектрических величин в электрические	B
Конденсаторы	C
Схемы интегральные, микросборки	D
Элементы разные	E
Разрядники, предохранители, устройства защитные	F
Генераторы, источники питания	G
Устройства индикаторные и сигнальные	H
Реле, контакторы, пускатели	K
Катушки индуктивности, дроссели, реакторы	L
Двигатели	M
Приборы измерительные	P
Выключатели и разъединители в силовых цепях	Q
Резисторы	R
Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	S
Трансформаторы, автотрансформаторы	T
Устройства связи. Преобразователи электрических величин в электрические	U
Устройства электровакуумные и полупроводниковые:	V
диод, стабилитрон	VD
прибор электровакуумный	VL
транзистор	VT
тиристор	VS

Примеры видов элементов	Код
Линии и элементы СВЧ	W
Соединения контактные:	X
контакт скользящий	XA
штырь	XP
гнездо	XS
соединение разборное	XT
соединитель высокочастотный	XW
Устройства механические с электромагнитным приводом	Y
Устройства оконечные	Z

12.7. ПРИМЕРЫ УСЛОВНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ (ГОСТ 2.721-74)

Т а б л и ц а 12.1

Наименование	Обозначение
Элементы привода и управляющих устройств: а) привод электро-машинный	
б) привод электро-магнитный	

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ (ГОСТ 2.722-68)

Устанавливаются три способа построения условных графических обозначений электрических машин (табл. 12.2): упрощенный однолинейный, упрощенный многолинейный (форма I), развернутый (форма II).

В упрощенных однолинейных обозначениях электрических машин обмотки статора и ротора изображают в виде окружностей. Выводы обмоток статора и ротора показывают одной линией с указанием на ней количества выводов.

В упрощенных многолинейных обозначениях обмотки статора и ротора изображают аналогично упрощенным однолинейным обозначениям, показывая выводы обмоток статора и ротора полностью.

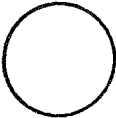
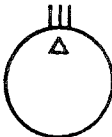
В развернутых обозначениях обмотки статора изображают в виде цепочек полуокружностей, а обмотки ротора — в виде окружности (и наоборот).

Выводы обмоток статора и ротора в обозначениях машин всех типов допускается изображать с любой стороны (см. табл. 12.2).

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ, РЕАКТОРЫ, ДРОССЕЛИ, ТРАНСФОРМАТОРЫ, АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ И МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ГОСТ 2.723-68)

Для условных графических обозначений трансформаторов и автотрансформаторов (табл. 12.3) устанавливаются три способа построения аналогично обозначениям электрических машин (см. выше, ГОСТ 2.722-68).

Т а б л и ц а 12.2

Наименование	Обозначение
Обмотка добавочных полюсов, обмотка компенсационная	
Обмотка статора машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машины постоянного тока	
Обмотка параллельного возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения	
Статор. Общее обозначение	
Статор с трехфазной обмоткой: а) соединенной в треугольник	Форма I  Форма II 

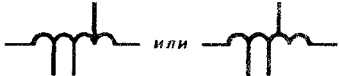
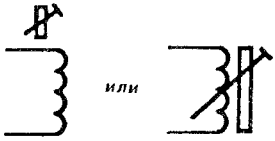
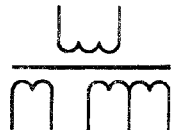
О к о н ч а н и е т а б л . 12.2

Наименование	Обозначение
<i>Примеры построения обозначений электрических машин</i>	
Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором; обмотка ротора соединена в звезду, обмотка статора — в треугольник	Форма I Форма II

Т а б л и ц а 12.3

Наименование	Обозначение
<i>Обозначение элементов катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей</i>	
Обмотка трансформатора, автотрансформатора, дросселя и магнитного усилителя	

Окончание табл. 12.3

Наименование	Обозначение
<i>Примеры построения обозначений катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей</i>	
Реактор	
Катушка индуктивности с отводами	
Катушка индуктивности со скользящими контактами	
Реактор (дроссель) с магнитопроводом	
Трансформатор без магнитопровода с постоянной связью	
Трансформатор однофазный с магнитопроводом	Форма I  Форма II 
Трансформатор однофазный с магнитопроводом трехобмоточный	Форма I  Форма II 
Автотрансформатор однофазный с магнитопроводом	Форма I  Форма II 
Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой	Форма I  Форма II 
Трансформатор напряжения измерительный	Форма I  Форма II 

ТОКОСЪЕМНИКИ (ГОСТ 2.726-68)

Т а б л и ц а 12.4

Наименование	Обозначение
Токосъемник троллейный:	
а) общее обозначение	
б) управляемый пантограф	
в) с третьего рельса	
Токосъемник кольцевой	
Примечание. Допускается использовать следующее обозначение	

РАЗРЯДНИКИ. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ (ГОСТ 2.727-68)

Т а б л и ц а 12.5

Наименование	Обозначение
Разрядник. Общее обозначение	
Промежуток искровой двухэлектродный. Общее обозначение	
Предохранитель пробивной	
Предохранитель плавкий. Общее обозначение	

РЕЗИСТОРЫ. КОНДЕНСАТОРЫ (ГОСТ 2.728-74)

Т а б л и ц а 12.6

О к о н ч а н и е т а б л . 12.6

Наименование	Обозначение
Резистор постоянный	
Резистор постоянный с одним симметричным отводом	
Шунт измерительный	
Резистор переменный	
Конденсатор постоянной емкости	

Наименование	Обозначение
Примечание. Для указания поляризованного конденсатора используют обозначение	
Конденсатор переменной емкости	
Конденсатор подстроечный	
Вариконд	

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (ГОСТ 2.729-68)

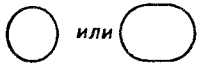
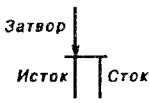
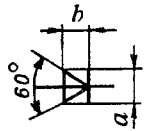
Таблица 12.7

Окончание табл. 12.7

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Датчик измеряемой неэлектрической величины		Гальванометр	
Датчик давления с токовым выходом		Синхроскоп	
Прибор электроизмерительный:		Осциллоскоп	
а) показывающий		Осциллограф	
б) регистрирующий		Счетчик импульсов	
в) интегрирующий (например, счетчик электрической энергии)		Болометр полупроводниковый	
Примечание. Для указания назначения электроизмерительного прибора в его обозначение вписы- вают условные графические обоз- начения, установленные в стандар- тах ЕСКД, а также буквенные обо- значения единиц измерения или из- меряемых величин, например:		Датчик температуры	
а) амперметр	A	Термопреобразователь бесконтактный	
б) вольтметр	V		
в) вольтамперметр	VA		
г) ваттметр	W		
д) варметр	var		
е) микроамперметр	μA		
ж) милливольтметр	mV		
з) омметр	Ω		
и) мегаомметр	MΩ		
к) частотомер	Hz		
л) фазометр: измеряющий сдвиг фаз измеряющий коэффици- ент мощности	φ cos φ		
м) счетчик ампер-часов	Ah		
н) счетчик ватт-часов	Wh		
о) счетчик вольт-ампер- часов реактивный	varh		
п) термометр	t°		
р) индикатор полярности	±		
с) измеритель уровня сигнала	dB		

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ (ГОСТ 2.730-73)

Т а б л и ц а 12.8

Наименование	Обозначение						
Обозначение конструктивных элементов							
Корпус полупроводникового прибора							
Вывод полупроводникового прибора:							
а) электрически не соединенный с корпусом							
б) электрически соединенный с корпусом							
Вывод от корпуса							
Электроды:							
база с одним выводом							
база с двумя выводами							
p-эмиттер с n-областью							
n-эмиттер с p-областью							
несколько эмиттеров, например четыре p-эмиттера с n-областью	 или 						
коллектор с базой							
несколько коллекторов, например четыре коллектора на базе							
Области:							
область между полупроводниковыми слоями с различной электропроводностью							
исток, сток, затвор							
Примеры построения обозначений полупроводниковых диодов							
Диод. Общее обозначение							
<table><tr><td>a</td><td>5</td><td>6</td></tr><tr><td>b</td><td>4</td><td>5</td></tr></table>	a	5	6	b	4	5	
a	5	6					
b	4	5					

Продолжение табл. 12.8

Наименование	Обозначение
Туннельный диод	
Обращенный диод	
Стабилитрон:	
а) односторонний	
б) двусторонний	
Варикап	

Примеры построения обозначений тиристоров

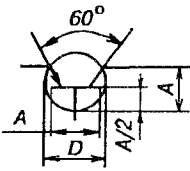
Тиристор диодный (динистор)	
Тиристор диодный симметричный	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по аноду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом p-типа)	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по катоду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом n-типа)	
Тиристор триодный запираемый с управлением по аноду	
Тиристор триодный запираемый с управлением по катоду	
Тиристор триодный симметричный незапираемый	

Пр и м е ч а н и е. Для упрощения допускается выполнять условные графические обозначения тиристоров в зеркальном изображении

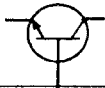
Примеры построения обозначений транзисторов с p-n-переходами

Транзистор типа p-n-p

D	12	14
A	9	11



Транзистор типа n-p-n с коллектором, электрически соединенным с корпусом



Продолжение табл. 12.8

Наименование	Обозначение
Лавинный транзистор типа n - p - n	
Однопереходный транзистор с n -базой	
Однопереходный транзистор с p -базой	
Транзистор типа p - n - p с двумя базовыми выводами	
Многосмиттерный транзистор типа n - p - n	
П р и м е ч а н и е. Для упрощения допускается: а) выполнять обозначения транзисторов в зеркальном изображении, например б) не изображать корпус, если смысл обозначения не меняется и корпус не используется для электрического подключения	

Примеры построения обозначений полевых транзисторов

Полевой транзистор с каналом n -типа		
D	12	14
a	2,5	3,5
b	3	4

Полевой транзистор с каналом p -типа

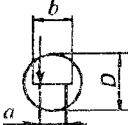
Полевой транзистор с изолированным затвором:

а) обогащенного типа с p -каналом

б) обогащенного типа с n -каналом

в) обедненного типа с p -каналом

г) обедненного типа с n -каналом







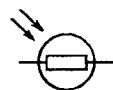


Продолжение табл. 12.8

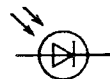
Наименование	Обозначение
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с p -каналом с выводом от подложки	
Полевой транзистор с изолированным затвором обогащенного типа с n -каналом и с внутренним соединением подложки и истока	
Полевой транзистор с двумя изолированными затворами обедненного типа с n -каналом и с выводом от подложки	
Примечание. Изображение окружности для полевых транзисторов является обязательным	

Примеры построения обозначений фоточувствительных излучающих и оптоэлектронных полупроводниковых приборов

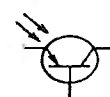
Фоторезистор



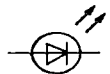
Фотодиод



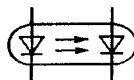
Фототиристор диодный

Фототранзистор типа $p-n-p$ 

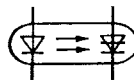
Светоизлучающий диод



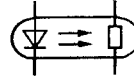
Диодная оптопара



Тиристорная оптопара



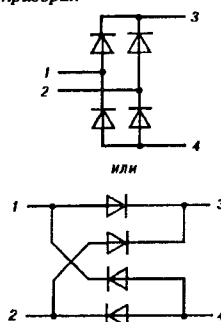
Резисторная оптопара



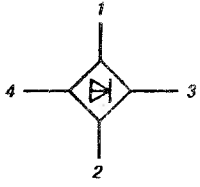
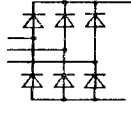
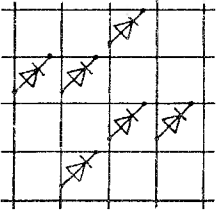
Примеры изображения типовых схем на полупроводниковых приборах

Однофазная мостовая выпрямительная схема:

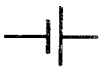
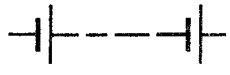
а) развернутое изображение



О к о н ч а н и е т а б л . 12. 8

б) упрощенное изображение	
Трехфазная мостовая выпрямительная схема	
Диодная матрица (фрагмент)	

И С Т О Ч Н И К И С В Е Т А (Г О С Т 2.732-68)	
Т а б л и ц а 12.9	
Наименование	Обозначение
<i>Знаки, характеризующие работу приборов</i>	
Излучение:	
а) видимое	×
б) ультрафиолетовое	× ^{UV}
в) инфракрасное	× ^{IR}
Излучение импульсное	⌒
<i>Примеры построения обозначений источников света</i>	
Лампа накаливания осветительная и сигнальная	
Лампа газоразрядная осветительная и сигнальная	

Х И М И Ч Е С К И Е И С Т О Ч Н И К И Т О К А (Г О С Т 2.742-68)	
Т а б л и ц а 12.10	
Наименование	Обозначение
Элемент гальванический или аккумуляторный	
Батарея из гальванических элементов или аккумуляторов	
Примечание. Батарею допускается обозначать так же, как элемент. При этом над обозначением проставляют напряжение батареи	

ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ (ГОСТ 2. 743-82)

Условное графическое обозначение двоичного логического элемента (табл. 12.11, 12.12) имеет форму прямоугольника, который может содержать три поля: основное и два дополнительных. Дополнительные поля располагают справа и слева от основного поля. Допускается дополнительные поля разделять на зоны, которые отделяют горизонтальной чертой. В первой строке основного поля помещают обозначение функции, выполняемой элементом, в дополнительных полях — информацию о функциональных назначениях выводов (рис. 12.21). Входы элемента изображают с левой стороны условного графического обозначения, выходы — с правой стороны.

Не допускается проводить линии выводов на уровне сторон прямоугольника, проставлять на линии выводов стрелки, указывающие направление потоков информации.

Допускается поворачивать условное графическое обозначение на угол 90° , при этом входы располагают сверху, выходы — снизу.

Размеры условного графического обозначения по высоте должны быть кратны $C/2$, где C не менее 5 мм. При этом расстояние между горизонтальной стороной прямоугольника и ближайшей линией вывода должно быть не менее и кратным $C/2$. Размеры условного графического обозначения по ширине определяются наличием дополнительных полей, количеством знаков внутри основного поля размером шрифта. Ширина дополнительного поля должна быть не менее 5 мм. Начертание условных графических обозначений приведено на рис. 12.22.

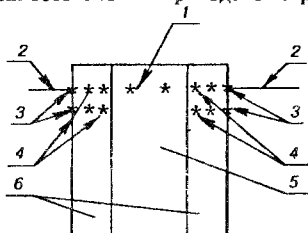


Рис. 12.21. Условное графическое обозначение двоичного логического элемента:

1 — обозначение функции элемента; 2 — линия вывода; 3 — указатели; 4 — метки; 5 — основное поле; 6 — дополнительные поля

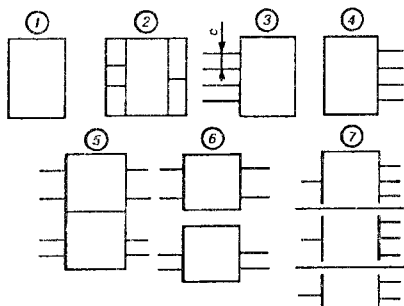


Рис. 12.22. Начертание условных графических обозначений:

1 — основное поле; 2 — основное поле с дополнительными полями, разделенными на зоны; 3 — входы элемента; 4 — выходы элемента; 5, 6 — расположение групп элементов: совмещенное (5) и несовмещенное (6); 7 — изображение условного графического обозначения, разделенного линиями электрической связи

Таблица 12.11

Наименование	Обозначение
Вычислитель	<i>CP</i>
Процессор	<i>P</i>
Память	<i>M</i>
Управление	<i>CO</i>
Перенос	<i>CR</i>
Прерывание	<i>INR</i>
Передача	<i>TF</i>
Прием	<i>RC</i>
Вход-выход	<i>IO</i>
Арифметика:	<i>A</i>
суммирование	<i>SM</i> или Σ
умножение	<i>MPL</i>
деление	<i>DIV</i>
вычитание	<i>SUB</i>
Логика:	<i>L</i>
логический порог	$\geq n$ или $= \triangleright = n$
мажоритарность (n из m)	$\geq n$
логическое ИЛИ (1 из m)	≥ 1
логическое И (n из m)	$\&$ или <i>И</i>
повторитель ($m=1$), где m — число входов логического элемента	<i>1</i>
<i>n</i> и только <i>n</i>	$= n$
<i>n</i> = 1 — исключающее ИЛИ	$= 1$
Регистр	<i>RG</i>
Счетчик	<i>CT</i>
Дешифратор	<i>DC</i>
Шифратор	<i>CD</i>
Преобразователь	<i>X/Y</i>
Сравнение	$=$
Свертка по модулю	<i>Mn</i>
Мультиплексор	<i>MUX</i>
Демультимплексор	<i>DMX</i>
Мультиплексор-селектор	<i>MS</i>
Селектор	$\sqcap$ <i>SL</i>
Генератор	<i>G</i>
Пороговый элемент (триггер Шмитта)	$\sqcup$ или <i>TH</i>
Дискриминатор	или <i>DIC</i>
Триггер	<i>T</i>
Задержка	$\dashv$ или <i>DL</i>
Формирователь	<i>F</i>
Усилитель	$\triangleright$ или $>$
Ключ	<i>SW</i>
Модулятор	<i>MD</i>
Демодулятор	<i>DM</i>
Нелогический элемент	$*$

Примечание. Знак * проставляют перед обозначением функции элемента, если все выходы элемента являются нелогическими.

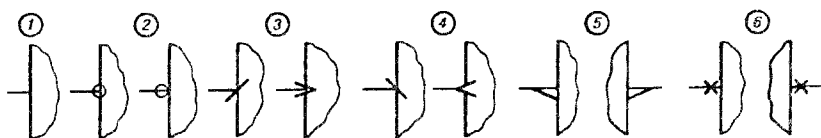


Рис. 12.23. Обозначение указателей входов-выходов:

1, 2 — статические входы: прямой (1), инверсный (2); 3, 4 — динамические входы: прямой (3), инверсный (4); 5 — вход и выход указателя полярности; 6 — выходы, не несущие логической информации

Обозначение функций. Обозначение функции или совокупности функций, выполняемых элементом, образуют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и специальных знаков, записанных без пробелов. Количество знаков в обозначении функций не ограничено.

В обозначении сложной функции символы основных функций располагают в порядке прохождения сигналов через элемент, например двоичный счетчик с дешифратором на выходе *CTDC*. Символ функции помещают внутри основного поля в верхней его части. Если в основном поле записывают дополнительные данные, то их следует располагать ниже символа функции.

Обозначения выводов элементов. Выводы элементов подразделяются на статические и динамические, несущие и не несущие логическую информацию. Статические и динамические выводы подразделяют на прямые и инверсные. На прямом статическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе в активном состоянии находится в состоянии логическая 1 (Л1) в принятом логическом соглашении. На инверсном статическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе в активном состоянии находится в состоянии логический 0 (Л0) в принятом логическом соглашении.

На прямом динамическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, если сигнал на этом выводе изменяется из состояния Л0 в состояние Л1 в принятом логическом соглашении. На инверсном динамическом выводе двоичная переменная имеет значение 1, когда сигнал на этом выводе изменяется из состояния Л1 в состояние Л0 в принятом логическом соглашении.

Вывод элемента должен иметь условное обозначение, состоящее из указателя и метки, проставляемой в дополнительных полях условного графического обозначения элемента (рис. 12.23). В качестве меток вывода допускается применять обозначения функций, приведенные выше.

Сокращенные обозначения групп элементов. Группу элементов, изображенных совмещенно и содержащих частично или полностью одинаковую информацию в основном поле условного графического обозначения, допускается изображать упрощенно (рис. 12.24). В схемах с повторяющимися элементами одного типа и имеющих большое количество выводов одного функционального назначения допускается один элемент начертить полностью, а остальные повторять сокращенно. В зоне сокращенной группы выводов указывают метки первого и

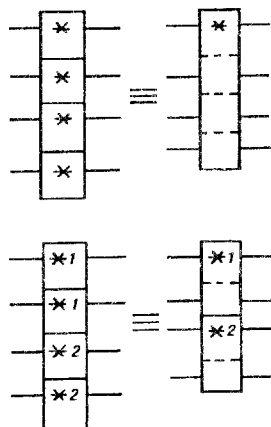


Рис. 12.24. Пример упрощенного изображения элементов

последнего выводов, а линии связи объединяют в одну групповую линию связи (рис. 12.25).

В схемах с повторяющимися однотипными элементами, кроме метода, описанного выше, допускается применять пакетный метод сжатия информации, т.е. пакетное изображение элементов

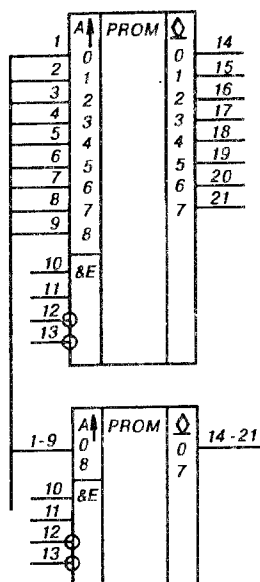


Рис. 12.25. Пример упрощенного изображения выводов элементов

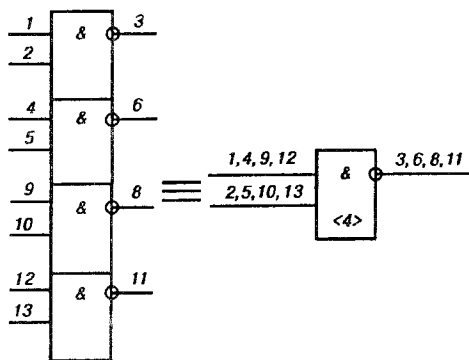


Рис. 12.26. Пример условного графического обозначения пакетов элементов

и их связей. Краткая запись пакета информации может быть представлена следующим образом:

0,1; 0,1; 0,1; 0,1 — (0,1) 4 — последовательность 0,1 повторяется четыре раза;

2, 3, 4, 5 — 2 ÷ 5;

0, 0, 0, 1, 1, 1 — 3 (0,1) — каждый элемент в указанной последовательности повторяется 3 раза;

1, 3, 5, 7, 9 — 1, 3, 9.

Пакетное изображение применяют при одновременном соблюдении следующих условий: однотипность группы элементов; однотипность входных и выходных сигналов группы элементов; регулярность сигналов в каждом пакете, допускающая их удобное перечисление. Пример условного графического обозначения пакетов элементов приведен на рис. 12.26.

ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ, УСТРОЙСТВА И УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ (ГОСТ 2.745-68)

Расположение выводов в обозначениях электро-термических установок (табл. 12.13) не устанавливается и выбирается в зависимости от построения схемы. Поворот условных графических обозначений не допускается.

Допускается дополнение условных графических обозначений указаниями об устройствах для транспортировки садки. Допускается рядом с условными графическими обозначениями указывать рабочие параметры, например температуру, частоту, мощность.

КОММУТАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА И КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ (ГОСТ 2.755-87)

Коммутационные устройства (табл. 12.14) на схемах должны изображаться в положении, принятом за начальное. При этом направление движения подвижных контактов из начального положения к конечному не устанавливается.

ЭЛЕМЕНТЫ АНАЛОГОВОЙ ТЕХНИКИ (ГОСТ 2.759-82)

Построение условных графических обозначений аналоговых элементов (табл. 12.16) должно соответствовать ГОСТ 2.743-82 (см. выше). Аналоговый сигнал обозначается символом $\square$ или Δ , цифровой — #.

Таблица 12.12

Наименование	Обозначение
И — ИЛИ — НЕ	
Счетчик реверсивный четырехразрядный двоично-десятичный	
Дешифратор с управлением, преобразующий три разряда двоичного кода в восемь разрядов позиционного кода	
Селектор-мультиплексор двухразрядный, из четырех направлений в одно	
Устройство оперативное запоминающее, статического типа	

Т а б л и ц а 12.13

Наименование	Обозначение
<i>Обозначение электротермических установок и электронагревательных устройств</i>	
Установка электротермическая. Общее обозначение	
Устройство электротермическое с камерой нагрева; промышленная электропечь	
Устройство электротермическое без камеры нагрева; электронагреватель	
<i>Обозначение среды камеры нагрева</i>	
Среда твердая	
Среда жидкая	
Атмосфера:	
а) искусственная	
б) защитная	
Вакуум	
<i>Примеры обозначений промышленных электропечей и электронагревателей</i>	
Электропечь сопротивления. Общее обозначение	
Электронагреватель сопротивления. Общее обозначение	
Электропечь дуговая трехфазная прямого нагрева с перемешивающей катушкой	

Таблица 12.14

Наименование	Обозначение
<i>Обозначение контактов коммутационных устройств</i>	
Контакт коммутационного устройства. Общее обозначение:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	или или
в) переключающий	или
Контакт для коммутации силовой цепи:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
<i>Примеры построения обозначений двухпозиционных коммутационных устройств</i>	
Выключатель трехполюсный	
Выключатель трехполюсный с двумя замыкающими и одним размыкающим контактами	
Выключатель трехполюсный с автоматическим возвратом	
Выключатель высокого напряжения	
Отделитель	

Продолжение табл. 12.14

Наименование	Обозначение
Короткозамыкатель	
Выключатель путевой:	
а) однополюсный	
б) многополюсный, например трехполюсный	
Выключатель кнопочный нажимной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
<i>Примеры построения обозначений многопозиционных коммутационных устройств</i>	
Переключатель однополюсный многопозиционный, например четырехпозиционный	
Переключатель многопозиционный независимых цепей, например шести цепей	
<i>Примеры построения обозначений реле</i>	
Реле электрическое с замыкающим, размыкающим и переключающими контактами	
Реле электротепловое без самовозврата (= возвратом нажатием кнопки)	
<i>Обозначение контактов контактных соединений</i>	
Контакт контактного соединения:	
а) разъёмного соединения:	

Окончание табл. 12.14

Наименование	Обозначение
штырь	
гнездо	
б) разборного соединения	
в) неразборного соединения	
Контакт скользящий:	
а) по линейной токопроводящей поверхности	
б) по нескольким линейным токопроводящим поверхностям	
в) по кольцевой токопроводящей поверхности	

ВОСПРИНИМАЮЩАЯ ЧАСТЬ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
(ГОСТ 2.756-76)

Таблица 12.15

Наименование	Обозначение
Катушка электро-механического устройства	
Катушка электро-механического устройства трехфазного тока	
Воспринимающая часть электротеплового реле	

Таблица 12.16

Наименование	Обозначение
Усилитель. Общее обозначение. f — символ функции; m — коэффициент усиления; m_1 до m_k — коэффициенты усиления; W_1 до W_n — весовые коэффициенты; $u_i = m_i \times f(W_1 a_1, W_2 a_2, \dots, W_n a_n)$, где $i = 1, 2, \dots, k$; m W_i — коэффициенты передачи по i-му входу Усилитель операционный Усилитель суммирующий $u = -10 (0,1a + 0,1b + 0,2c + 0,5 \times d + 1,0e) = -(a + b + 2c + 5d + 10e)$ Усилитель интегрирующий. Если $f = 1, g = 0, h = 0$, то $u = -80 \left[c_{r=0} + \int (2a + 3b) dt \right]$ Усилитель дифференцирующий $u = 5 \frac{d}{dt} (a + 4b)$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

12.1. Александров К.К., Кузьмина Б.Г. Электротехнические чертежи и схемы. М.: Энергоатомиздат, 1990.

12.2. Бергхаузер Т., Шлив П. Система автоматизированного проектирования AutoCAD. М.: 1989.

Дополнительный

12.3. Государственные стандарты СССР. Еди-

ная система конструкторской документации. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1988.

12.4. Там же. Общие правила выполнения чертежей. М.: Изд-во стандартов, 1984.

12.5. Там же. Правила выполнения схем. М.: Изд-во стандартов, 1987.

12.6. Там же. Обозначения условные графические в схемах. М.: Изд-во стандартов, 1985.

12.7. Там же. Правила выполнения чертежей различных изделий. М.: Изд-во стандартов, 1986.

Раздел 13

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ШУМЫ И ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ РАДИОПОМЕХИ

СОДЕРЖАНИЕ

13.1. Виды промышленных шумов и вибраций и методы их измерения	276	термины и определения (288). Возникновение и распространение ИРП (289).	
Общие сведения (276). Аэродинамический (вентиляционный) шум электрических машин (278). Рекомендации по снижению вентиляционного шума (279). Вибрации и методы их измерения (280).		13.4. Нормирование ИРП	290
13.2. Шум и вибрация электрических машин	282	13.5. Испытания источников ИРП	291
Нормы на шум и вибрацию (282). Вибрации от неуравновешенности роторов (283). Магнитные вибрации и шумы (284). Определение частот собственных колебаний (285). Влияние соотношения количества пазов на вибрацию и шум (286). Подшипниковая вибрация и шум (287). Вибрация и шум щеточно-коллекторного узла (287). Шум трансформаторов (288).		Общие сведения (291). Условия испытания (291). Измерительные приборы (291). Обработка и оценка результатов испытаний (291).	
13.3. Индустриальные радиопомехи	288	13.6. Помехоподавляющие элементы и устройства	292
Общие сведения (288). Основные		Помехоподавляющие конденсаторы (292). Помехоподавляющие дроссели (294). Помехоподавляющие фильтры (294). Искрогасители (297). Помехоподавляющие провода (298). Помехоподавляющие экраны (298).	
		13.7. Подавление ИРП в отдельных источниках	301
		13.8. Комплексное и групповое подавление ИРП	304
		Список литературы	304

13.1. ВИДЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ШУМОВ И ВИБРАЦИЙ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Перед машиностроением поставлена задача создания машин и механизмов с низким уровнем шума и вибраций. Виброакустические показатели машины могут служить критерием качества ее проектирования и изготовления. Следует подчеркнуть отрицательное воздействие шумов и вибраций машин на их надежность и долговечность. Кроме того, шумы и вибрации, проникая в окружающую среду, оказывают вредное влияние на сооружения, установки, аппараты и другие устройства, снижают производительность труда человека, ухудшают

его здоровье. Последнее обстоятельство выдвигает борьбу с вибрацией и шумами в ряд социальных задач, решению которых придается важное значение.

Звуковое воздействие, вызывающее неприятные слуховые ощущения, принято считать шумом.

Вибрации и шумы машин и механизмов, в частности электрических [13.1], характеризуются интенсивностью и частотой. Встречающиеся в практике частоты вибраций и шумов можно разделить на диапазоны: низких (ниже 200 Гц), средних (от 200 до 2000 Гц) и высоких частот (выше 2000 Гц). Колебания с частотами ниже 16 Гц называют инфразвуком, выше 20 кГц — ультразвуком. Общий уровень шума и вибрации

Т а б л и ц а 13.1

Источники шума и вибрации

Тип электрической машины, частота вращения n , об/мин	Источник	
	шума	вибрации
Коллекторные микромашини, $n \leq 3000$	Подшипники, щетки	Дисбаланс ротора, подшипники
Однофазные асинхронные двигатели (АД), $n \leq 3000$	Вентилятор, электромагнитные силы, подшипники	Электромагнитные силы, дисбаланс ротора, подшипники
Трехфазные АД единой серии, $n \leq 1500$	Электромагнитные силы, подшипники, вентилятор	Дисбаланс ротора, подшипники, электромагнитные силы
То же, $n = 1500 \div 3000$	Вентилятор, подшипники, электромагнитные силы	Дисбаланс ротора, подшипники, электромагнитные силы
Машины постоянного тока малой и средней мощности, $n \leq 3000$	Вентилятор, электромагнитные силы, подшипники, щетки	Дисбаланс ротора, подшипники, электромагнитные силы
Крупные машины постоянного тока, $n \leq 1000$ (на подшипниках скольжения)	Вентилятор, щетки	Электромагнитные силы
Высокочастотные индукторные генераторы	Электромагнитные силы, вентилятор	Дисбаланс ротора, электромагнитные силы, подшипники
Турбогенераторы (на опорах скольжения)	Электромагнитные силы, вентиляторы (система охлаждения), щетки	Дисбаланс ротора, электромагнитные силы
То же в традиционном исполнении	Электромагнитные силы, подшипники, вентиляторы	Электромагнитные силы, подшипники, дисбаланс
Трансформаторы, реакторы	Магнитострикция, электромагнитные силы, вентиляторы	Магнитострикция, электромагнитные силы

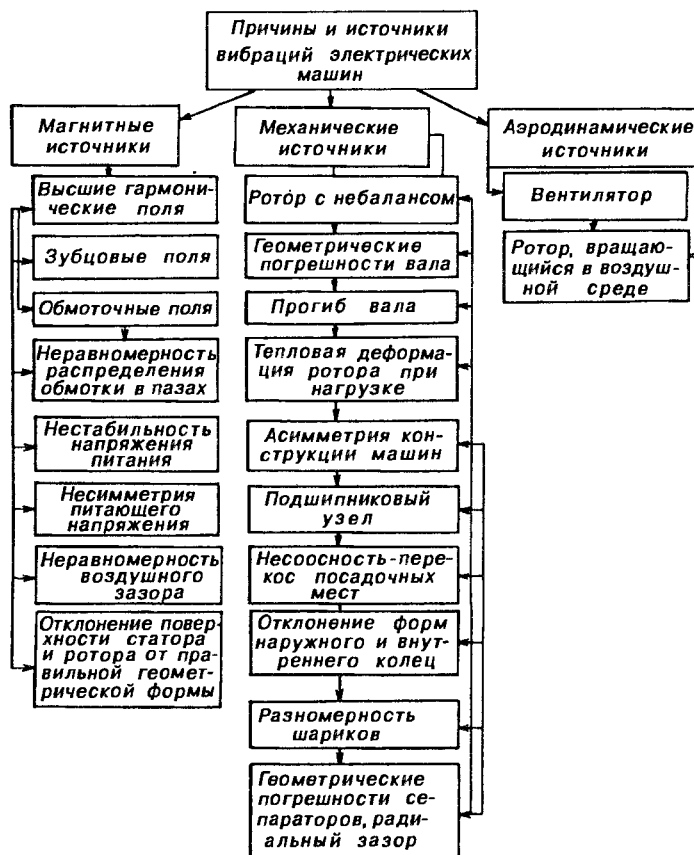


Рис.13.1. Источники вибрации и шума электрических машин

может определяться различными источниками (табл. 13.1, рис. 13.1) [13.2—13.5].

Наиболее вероятными причинами низкочастотных колебаний являются неуравновешенность вращающихся масс, несоосность приводов, нарушение соотношений геометрических размеров деталей и узлов машин и механизмов, периодические силы, возникающие при рабочем процессе от переменного магнитного поля. Колебания в среднечастотном диапазоне обусловлены высшими гармониками магнитных сил и сил, возбуждаемых неуравновешенностью ротора, нарушением геометрии кинематических пар, динамическим взаимодействием элементов ротора и статора. Колебания в высокочастотном диапазоне обусловлены гармониками электромагнитных сил «зубцового» порядка.

При рассмотрении физических характеристик звукового поля удобнее пользоваться термином «звук», оставив за понятием «шум» более широкий смысл — как совокупность звуков разных частот. Интенсивность звуков, с которыми приходится иметь дело на практике, изменяется в очень широких пределах [13.6 — 13.11].

Для удобства расчетов введена логарифмическая величина — уровень интенсивности звука, дБ, $L_I = 10 \lg (I / I_0)$, где I — оцениваемая интенсивность, Вт/м²; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² — пороговая интенсивность.

Для оценки воздействия звука на человека вводится величина — уровень звукового давления $L_p = 10 \lg (p^2 / p_0^2) = 20 \lg (p / p_0)$, где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — пороговое звуковое давление; p — измеряемое звуковое давление.

Связь между уровнем интенсивности звука и уровнем звукового давления устанавливается соотношением $L_I = L_p + 10 \lg (\rho_0 c_0 / \rho c)$, где ρ, c — измеряемые плотность воздуха и скорость звука; ρ_0 и c_0 — плотность воздуха и скорость звука при нормальных атмосферных условиях. При нормальных атмосферных условиях $L_I = L_p$. Звук характеризуется интенсивностью и частотой. Анализируемые значения звука аппроксимируются А-характеристикой усилителя. Анализатор (измеритель) с А-характеристикой дает значение в децибелах, которое представляет собой усредненный уровень звукового давления во всем диапазоне звуковой частоты. Следует также отметить, что уровни звукового давления достигают 100—120 дБ

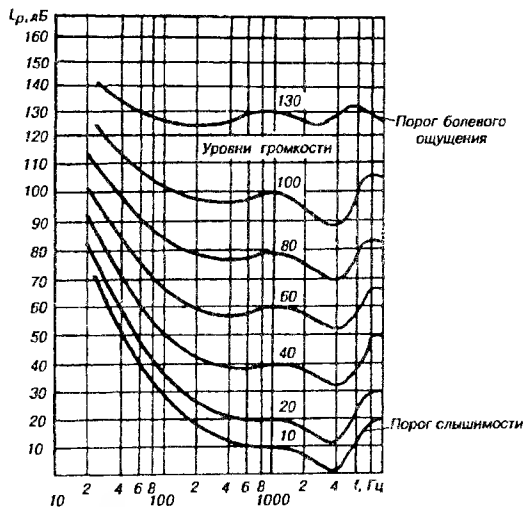


Рис. 13.2. Диаграммы громкости чистых тонов в свободном поле:

f — частота; L_p — уровни интенсивности звука, или уровни звукового давления

(рис. 13.2), при которых слушатель испытывает неприятное воздействие, а при значении $L_p = 130$ дБ возникают болевые ощущения. Причем болевые ощущения одинаковы во всем диапазоне частот.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ (ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ) ШУМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

На рис. 13.3 приведены типы конструкций лопаток центробежных вентиляторов электрических машин (ЭМ). Уровень шума, создаваемого вентилятором на расстоянии $l_0 = 1$ м от контура ЭМ, для конструкций рис. 13.3, а, б определяется

$$L = 60 \lg \frac{u_1}{u_0} + 10 \lg \frac{D_2 b_2}{\bar{b}_2^2} + \sum_{i=1}^6 k_i + 4,$$

где u_1 — окружная скорость вентилятора; u_0 — ее базовое значение; D_2 — наружный диаметр вентилятора, $D_2 = D_{2cp} = (D_2' + D_1'') / 2$; b_2 — ширина лопаток (наружной кромки вентилятора); k_i — поправочный коэффициент, дБ (А), зависящий от относительной производительности вентилятора $Q_{отн} = Q / Q_{max}$; Q — производительность

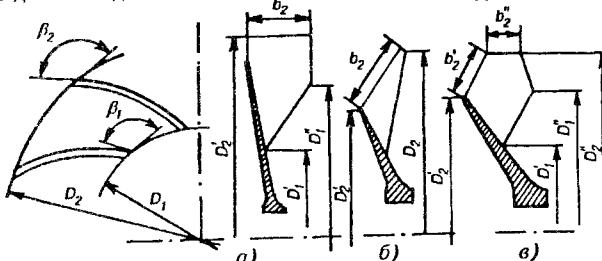


Рис. 13.3. Различные типы конструкций лопаток вентиляторов:

а — с наружной кромкой, параллельной оси вращения; б — с наклонной наружной кромкой; в — с ломаной линией наружной кромки

вентилятора; $Q_{\max}$ — максимальная производительность вентилятора.

Поправочный коэффициент k_i выбирают в зависимости от геометрических размеров вентилятора и профилей лопаток (рис. 13.4), причем, если $Q_{\text{отн}}$ неизвестна, то принимается $k_i = 2.7$ дБ. k_2 — поправочный коэффициент, зависящий от диаметра вентилятора (масштабный фактор): для конструкции рис. 13.3, а $k_2 = (10 \div 24.7) D_2$; для конструкции рис. 13.3, б $k_2 = (10 \div 17.5) \times \sqrt{(D_2')^2 - (D_2'')^2}$; k_3 — влияние угла атаки $\alpha_{\text{ат}} = \beta_2 - \beta_1$ (рис. 13.3, 13.4); для радиальных лопаток $k_3 = 1$ дБ, для $\beta_1 = 90^\circ$ $k_3 = 0$; k_4 — зависит от β_2 (рис. 13.3); k_5 — учитывает звукоизоляцию кожуха вентилятора (для обдуваемых ЭМ $k_5 = (-4 \pm 2)$ дБ, для ЭМ со встроенным вентилятором $k_5 = (-8 \pm 2)$ дБ; k_6 учитывает отношение D_2'/D_2'' (если $0.5 \leq D_2'/D_2'' \leq 1$, то $k_6 = 14.3 (D_2'/D_2'' - 1)$; для конструкции рис. 13.3, а $k_6 = 0$).

При расчете вентилятора по рис. 13.3, в его расчленяют плоскостями, перпендикулярными оси вращения, на необходимое количество частей, каждая из которых изображена на рис. 13.3, а или 13.3, б. Уровень звука в этом случае

$$L_v = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i}, \text{ где } L_i \text{ — уровень звука } i\text{-й}$$

части вентилятора, дБ (А); n — число частей вентилятора.

Пример. При $u = 15 \div 100$ м/с; $D \leq 0.5$ м; $D_2/D_1 = 1.1 \div 1.5$; $D_2'/D_2'' = 0.5 \div 1.0$; $b_2/D_2 = 0.1 \div 0.35$; $\beta_1 = 90 \div 160^\circ$; $\beta_2 = 90 \div 160^\circ$; точность расчета составляет ± 3 дБ (А).

Для сравнения различных конструктивных вариантов системы охлаждения по создаваемому шуму и получения критерия оптимальности конструкции системы охлаждения обдуваемых машин переменного тока предложена формула, выведенная на основании законов подобия и многочисленных экспериментов:

$$\begin{aligned} \bar{L}_v = L_v - 8.7 \lg \frac{\Sigma P}{P_0} + 28 \lg \frac{D_a}{D_0} + 26 \lg \frac{l_v}{l_0} - \\ - 62 \lg \frac{n}{n_0} + 12.2 \left(\lg \frac{n}{n_0} \right)^2 - 10 \lg \frac{\Theta}{\Theta_0}, \end{aligned}$$

где $\bar{L}_v$ — критерий шумности вентиляторного узла

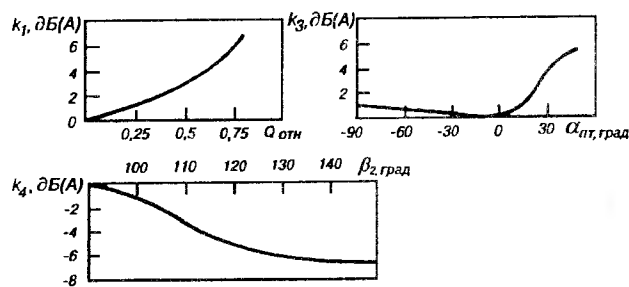


Рис. 13.4. Значения эмпирических поправочных коэффициентов k_1, k_3, k_4

и системы охлаждения, дБ (А); ΣP — сумма тепловых потерь, кВт; D_a — наружный диаметр пакета статора, м; l_a — длина пакета статора, м; Θ — перепад температуры между охлаждающей средой и охлаждаемой поверхностью, $^\circ\text{C}$; $P_0 = 1$ кВт; $D_0 = 1$ м; $l_0 = 1$ м; $n_0 = 1000$ об/мин; $\Theta_0 = 1^\circ\text{C}$.

По значению L_v можно объективно судить о качестве системы охлаждения и конструкции вентиляторного узла и также оценить эффект снижения шума (изменение L_v) при варьировании параметров, входящих в данную формулу. Так, например, снижение мощности асинхронного двигателя на одну ступень (что составляет примерно 26%) приводит к снижению шума на 5 дБ по шкале А) при сохранении того же превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды за счет уменьшения размеров вентилятора.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЮ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ШУМА

1. Для уменьшения требуемого количества охлаждающего воздуха необходимо избегать неоправданных запасов превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды, стремиться к рациональному потокораспределению в ЭМ, применять наиболее теплостойкую изоляцию и т.п.

2. Для ликвидации дискретной составляющей шума на частоте, обусловленной количеством лопаток вентилятора [13.13], необходимо любые неподвижные препятствия по направлению потока воздуха на выходе из вентилятора располагать на расстоянии превышающем $(0.1 \div 0.15) D_2$ от наружных кромок лопаток.

3. Количество лопаток вентилятора следует выбирать таким, чтобы расстояние между ними (по среднему диаметру) примерно равнялось длине пути воздуха в межлопаточном канале.

4. Без необходимости не следует применять реверсивные машины. Наклон лопаток на выходе из вентилятора рекомендуется выбирать в пределах $120-135^\circ$. При профилировании лопаток вентилятора при встроенном расположении колеса и явно выраженных полюсах ЭМ угол наклона лопаток на входе в вентилятор следует принимать 90° , так как при обтекании потоком явно выраженных полюсов невозможно обеспечить безударный вход воздуха.

5. При наличии аксиальных каналов в якоре рекомендуется двухструйный вентилятор (рис. 13.5).

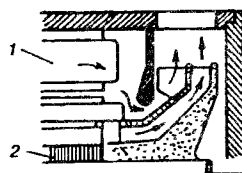


Рис. 13.5. Двухструйный вентилятор: 1 — статор; 2 — ротор

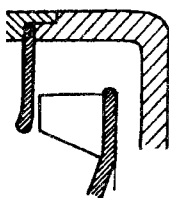


Рис. 13.6. Конструкция вентилятора с неподвижной передней стенкой

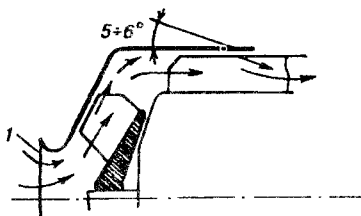


Рис. 13.7. Конструкция вентиляционного узла с диффузором 1 на входе и с поджатием потока воздуха на выходе

6. Переднюю стенку центробежного вентилятора без снижения его производительности можно выполнять неподвижной либо заменять кожухом (рис. 13.6).

7. Кожух вентилятора обдуваемых ЭМ целесообразно выполнять таким, чтобы на выходе поток воздуха прижимался к корпусу. Для этого достаточно изменить направление потока воздуха на $5 \div 6^\circ$ (рис. 13.7).

При частоте вращения более 3000 об/мин в обдуваемых ЭМ основные аэродинамические потери определяются конструкцией входа вентилятора. В этом случае на входе в кожух вентилятора необходим диффузор.

Учитывая, что шумовое загрязнение зависит не только от ЭМ, но от целого ряда механизмов и установок, в табл. 13.2 в качестве примера приведены акустические свойства вентиляторов различной конструкции.

ВИБРАЦИИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Периодической вибрацией называют колебательный процесс, в котором значения виброскорости (виброускорения, виброперемещения) повторяются через одинаковые промежутки времени. Периодическая вибрация может характеризоваться несколькими колебательными величинами одновременно. Гармонические составляющие определяют частотный спектр вибрации, который представляется графически набором дискретных линий (полигармоническая вибрация). К параметрам линейной вибрации относят: перемещение, скорость, ускорение, а к параметрам угловой — угол поворота, угловую скорость, угловое ускорение.

Амплитудные значения виброперемещения s , виброскорости v и виброускорения a гармонической вибрации связаны между собой соотношением

$$a = \omega v = \omega^2 s,$$

где ω — частота вибрации.

При исследовании полигармонических вибраций целесообразно использовать среднеарифметическое, среднеквадратичное и пиковое значения

колебательной величины, которые измеряют в диапазоне от нижней граничной частоты f_n до верхней граничной частоты f_v (от нескольких герц до 10 кГц). При необходимости рассматриваемый частотный диапазон делят на участки, которые называют поддиапазонами, или полосами частот. Ширину полосы или интервала, для которых $f_v = 2 f_n$ называют октавой, а если $f_v = \sqrt{2} f_n$ — третьоктавой.

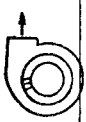
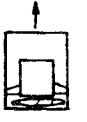
Для измерения шумовых характеристик необходимы строго определенные акустические условия измерения: свободное или диффузное звуковое поле. Свободное звуковое поле определяется наличием обратной пропорциональности между звуковым давлением и расстоянием от центра источника звука до исследуемой точки. Диффузное поле характеризуется постоянством плотности звуковой энергии в различных точках поля и постоянством углового распределения потока звуковой энергии в каждой точке.

Согласно ГОСТ 23941-79 устанавливаются следующие методы определения шумовых характеристик: точные, технические и ориентировочные. Точные измерения могут быть выполнены в реверберационной камере или в заглушенной камере (со звукоотражающим или звукопоглощающим полом), технические измерения — в реверберационном помещении, в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью; ориентировочные измерения — в закрытом помещении или на открытой площадке.

Заглушенная камера представляет собой хорошо изолированное от внешних шумов и вибраций помещение, в котором звуки почти полностью (до 99 %) поглощаются при падении на ограждающие поверхности. Звук поглощают специальные конструкции, обеспечивающие плавный переход от малого акустического сопротивления воздуха в камере к большому акустическому сопротивлению стен камеры, для облицовки которых применяют либо слоистые конструкции, либо клиновидные. Клинья собираются в блоки и закрепляются на определенном расстоянии от внутренней поверхности ограждений камеры. Слоистые покрытия, более простые в изготовлении, состоят из перемежающихся слоев воздуха и поглощающего материала. Толщина слоев материала (или его плотность) возрастает по мере приближения к внутренней поверхности ограждения.

Коробка камеры изготавливается из кирпича или железобетонных плит и устанавливается на амортизаторы или фундамент, изолированный от общего фундамента здания. Дверь камеры плотно закрывается и по акустическим свойствам аналогична стенам камеры. В камере со звукопоглощающим полом натягивают капроновую или стальную сетку для передвижения обслуживающего персонала. Реверберационной, или диффузной, камерой называют шумо- и виброизолированное помещение, в котором звук практически полностью отражается от ограждающих поверхностей. Для создания диффузного звукового поля камера в плане или в вертикальной плоскости имеет форму неправильного многоугольника.

Т а б л и ц а 13.2
Акустические свойства различных типов вентиляторов

Тип вентилятора	Уровень удельной акустической мощности P_v , дБ, относительно 10 Вт							Область применения
	35	35	34	32	31	26	18 10 3	
Крыльчатый 	35							Наиболее эффективный из центробежных вентиляторов, имеет от 10 до 16 лопастей. Используется в отопительных системах, вентиляции и кондиционерах, системах с низким, средним и высоким давлением в промышленных вытяжных установках с высокоэффективной системой очистки воздуха
Радиальный 	48	45	43	43	38	33	29 5—8	Простой по конструкции центробежный вентилятор, но с относительно низкой эффективностью, имеет от 6 до 10 лопастей. Используется в вытяжной вентиляции загрязненных газов и газовой рециркуляции. Применяется в промышленных системах высокого давления
Лопасты наклонены вперед 	40	38	38	34	28	24	15 2	Имеет от 24 до 64 лопастей, обладает наименьшими размерами из всех типов центробежных вентиляторов и работает на очень низкой скорости. Используется в отопительных, вентиляционных установках и установках для кондиционирования воздуха низкого давления, например в домашних печах и компактном оборудовании для кондиционирования
Аксиальные лопатки 	42	39	41	42	40	37	25 6—8	Высокоэффективный осевой вентилятор, работающий при высоком давлении. Лопасты могут быть неподвижными или поворотными. Имеет от 3 до 16 лопастей. Конструкция имеет направляющие лопасти вдоль колеса, что позволяет получить хорошее протекание воздуха в сторону выходного отверстия. Используется для нагнетания, вентиляции и кондиционирования воздуха в системах низкого и высокого давления. Можно также применять в промышленности, например для сушительных печей, кабин для окрашивания распылением и вытяжных систем
Трубчатый аксиальный 	44	42	46	44	42	40	37 30 6—8	Количество лопастей меняется от 4 до 8, диаметр ступицы колеса на 50 % больше его внешнего диаметра. Вентилятор без направляющих лопастей нисходящего потока. Применяют в промышленности для сушительных печей, кабин для окрашивания распылением и вытяжных дымовых систем, в отопительных вентиляционных системах
Пропеллерный 	51	48	49	47	45	45	31 5—7	Представляет собой недорогостоящую конструкцию. Обычно имеет от 2 до 8 лопастей одной толщины, прикрепляемых к относительно небольшой ступице. Корпус выполнен в виде круглого кольца или пластины с отверстием. Применяется для перемещения воздуха большого объема при низком давлении, например циркуляции воздуха в пространстве, или в качестве вытяжного вентилятора, устанавливаемого на крышах и на стенах

Существующие для целей измерения приборы можно разделить на две основные группы: универсальные и специальные.

Основу универсальных приборов для измерения шума и вибрации составляют измерительный преобразователь сигнала и регистрирующее устройство с корректирующими и регулируемыми цепями. При этом многие приборы позволяют производить измерения обоих параметров при подключении соответствующего первичного измерительного преобразователя (датчика). В динамических режимах широко применяются пьезоэлектрические измерительные преобразователи. Основными преимуществами таких преобразователей являются: широкий диапазон рабочих частот, большая вибрационная и ударная прочность, простота конструкции, малая чувствительность к магнитным полям, возможность создания высокотемпературных преобразователей с малыми размерами и массой.

Емкостные преобразователи также находят применение для измерения параметров вибрации, но особенно широко они используются для акустических измерений (конденсаторные микрофоны).

Специальные приборы функционально предназначены только для измерения определенного параметра, например виброперемещения, виброскорости, виброскорости, звукового давления. Конструкция приборов в значительной степени определяется типом и конструкцией измерительного преобразователя. Универсальные приборы позволяют путем смены измерительного преобразователя производить измерения как параметров вибрации, так и шума. Эти приборы выполняются, как правило, в виде измерительных усилителей, которые могут комбинироваться с различного рода корректирующими фильтрами и схемами усреднения.

Для исследования спектрального состава шума и вибрации используются электронные анализаторы. Анализатор с полосовыми фильтрами получил название спектрометра. Для нормирования шума и вибрации в основном применяют спектрометры с октавными и третьоктавными полосами пропускания. Узкополосные анализаторы применяют для диагностирования и исследовательских целей, определения резонансных частот. В последнее время получили распространение анализаторы в реальном масштабе времени, удобные для визуального наблюдения и анализа частотных спектров.

Принципы действия, конструкции и характеристики приборов для виброакустических исследований подробно описаны в [13.2].

13.2. ШУМ И ВИБРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

НОРМЫ НА ШУМ И ВИБРАЦИЮ

Электромашиностроение является одной из тех отраслей, где вопросам снижения шума и вибрации постоянно уделяется большое внимание [13.12, 13.13].

В качестве нормируемых величин шума принимают средний уровень звука на расстоянии 1 м от

контура машины при наличии звукоотражающего пола, обозначаемый L_{d1A} , или скорректированный уровень звуковой мощности L_{PA} , и соответствующие ему октавные уровни звуковой мощности L_P , определяемые по ГОСТ 11929-87.

Средний уровень звука, дБ (А), вычисляется по формуле:

$$L_{d1A} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^k 10^{0,1L_{d1A_i}} \right) - 10 \lg k,$$

где L_{d1A_i} — уровень звука в i -й точке измерения на расстоянии 1 м от контура машины; k — количество точек измерения. Выбор точек измерения осуществляется согласно ГОСТ 11929-87.

Если усредняемые уровни отличаются друг от друга не более чем на 5 дБ(А), то за средний уровень принимается их среднеарифметическое значение.

В зависимости от требований к шуму ЭМ согласно ГОСТ 16372-84 разделяются на четыре класса:

класс 1 — машины, к которым не предъявляются специальные требования по уровню шума;

класс 2 — машины с малошумными подшипниками качения, со специальными малошумными конструкциями вентиляторов и т.п. Их уровень шума должен быть на 5 дБ(А) ниже, чем допустимые уровни шума ЭМ класса 1;

класс 3 — машины с пониженным использованием активных материалов, закрытые (с водяным или естественным охлаждением), с глушителем вентиляционного шума, с подшипниками скольжения. Уровень шума этих ЭМ должен быть на 10 дБ(А) ниже, чем допустимый уровень шума ЭМ класса 1;

класс 4 — машины со звукоизолирующим кожухом или другими существенными изменениями конструкции, выполненными в целях снижения шума. Предельные значения шума должны быть не менее чем на 15 дБ(А) ниже, чем для класса 1.

Машины класса 1 при степени защиты IP44 и IP22 должны иметь в режиме холостого хода средний уровень звука L_{d1A} не выше значений, указанных в табл. 13.3.

Машины всех классов должны иметь октавные уровни звуковой мощности L_{Pi} не выше значений, определяемых по формуле

$$L_{Pi} = L_{PA} + \Delta L_i,$$

где L_{PA} — скорректированный уровень звуковой мощности; ΔL_i — поправочный коэффициент для расчета октавных уровней звуковой мощности, значения которого приведены ниже:

f , Гц...63 125 250 500 1000 2000 4000 8000

ΔL_i , дБ...15 16 14 7 3 4 6 10

За оцениваемый параметр вибрации, создаваемой ЭМ, по ГОСТ 16921-83 принимается максимальное из среднеквадратичных значений виброскорости v_e , мм/с, измеренных по ГОСТ

Т а б л и ц а 13.3

Пределные значения средних уровней звуковой мощности электрических машин класса 1, дБ (А)

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин											
	600-900		900-1320		1320-1900		1900-2360		2360-3150		3150-3750	
	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22	IP44	IP22
Свыше 0,25 до 1,1	67	64	70	67	71	69	74	72	75	75	79	78
Свыше 1,1 до 2,2	69	65	70	68	73	71	78	75	80	78	82	81
Свыше 2,2 до 5,5	72	68	74	71	77	75	82	78	83	81	85	84
Свыше 5,5 до 11	75	72	78	75	81	78	86	81	87	84	90	87
Свыше 11 до 22	78	75	82	78	85	81	87	83	91	87	93	90
Свыше 22 до 37	80	78	84	81	86	83	89	85	92	88	95	92
Свыше 37 до 55	81	79	86	83	88	86	92	88	94	90	97	93
Свыше 55 до 110	84	82	89	85	92	88	93	90	96	92	98	95
Свыше 110 до 220	87	85	91	87	94	90	96	93	98	95	100	96
Свыше 220 до 400	88	86	92	90	96	92	98	94	99	95	102	98
Свыше 440 до 630	89	88	93	92	97	94	99	95	100	96	103	98
Свыше 630 до 1000	91	90	95	93	98	95	100	96	101	97	104	99

П р и м е ч а н и е. Степень защиты по ГОСТ 17494-87: IP44 — исполнение закрытое, обдуваемое; IP22 — исполнение защищенное, с внутренней вентиляцией (продуваемое).

12379-75 в диапазоне от рабочей частоты вращения до 2000 Гц. Для ЭМ с рабочей частотой вращения до 3600 об/мин допускается измерение v_e до 1000 Гц.

Если в стандартах или технических условиях на машины конкретных типов предусмотрен спектральный анализ вибрации, то в качестве нормируемых параметров вибрации наряду с v_e принимают спектральные составляющие виброскорости или виброускорений a_e , м/с².

При обработке результатов измерения допускаются выражения вибрационного ускорения и скорости, дБ: $L_a = 20 \lg (a_e / a_0)$; $L_v = 20 \lg (v_e / v_0)$, где базовое ускорение $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/с², базовая скорость $v_0 = 5 \cdot 10$ мм/с.

Для оценки вибрации ЭМ установлены следующие классы вибрации:

В зависимости от требований к значению вибрации ЭМ делят на три категории: нормальные N ; с пониженной вибрацией R ; особо жесткими требованиями к вибрации S . Для однотипных машин допустимые вибрации при переходе от одной категории к другой ужесточаются не менее чем на один класс.

ВИБРАЦИИ ОТ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ РОТОРОВ

Одной из основных причин механических вибраций и шумов является неуравновешенность масс роторов. Балансировка роторов — обязательный и главный способ уменьшения создаваемых ими вибраций и шумов. Показателем качества балансировки ротора является величина $e\omega$, мм · рад/с, где e — удельный остаточный дисбаланс ротора; ω — угловая скорость ротора.

Класс	0,28	0,45	0,71	1,12	1,8	2,8	4,5	7,1
Максимально допустимое значение, мм/с	0,28	0,45	0,71	1,12	1,80	2,80	4,5	7,10

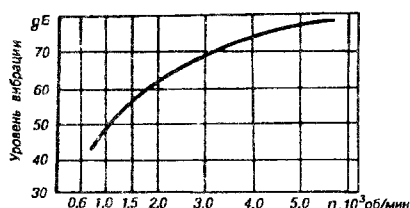


Рис. 13.8. Изменение уровня вибрации при изменении частоты вращения.

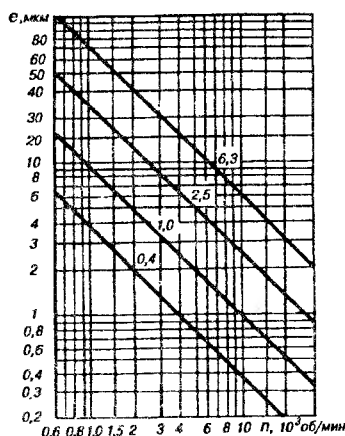


Рис. 13.9. Допустимые удельные остаточные дисбалансы роторов электрических машин

Для роторов электрических машин установлены четыре класса точности балансировки роторов:

Класс	6,3	2,5	1,0	0,4
Наибольшие допустимые значения $e\omega$, мм·рад/с	6,3	2,5	1,0	0,4

Ротеры электрических машин в зависимости от их массы, кг, делятся на три группы: от 0,01 до 0,1 — микроротеры, от 0,1 до 3 — малые ротеры; от 3 до 1000 — средние ротеры. Для средних ротеров следует использовать классы точности балансировки 6,3; 2,5; 1,0, для малых и микроротеров — классы точности 2,5; 1,0; 0,4.

Следует иметь в виду, что при увеличении частоты вращения ротора в два раза уровень вибрации, обусловленный небалансом, возрастает на 6 дБ (рис. 13.8).

Наибольшие допустимые значения удельного остаточного дисбаланса ротора e в зависимости от рабочей частоты n для принятых классов балансировки приведены на рис. 13.9. Приведенные данные применимы к роторам, которые при балансировке устанавливаются в цапфах вала или в собственных подшипниках, а также в полностью собранной машине, у которой имеется доступ к плоскостям коррекции дисбаланса ротора.

МАГНИТНЫЕ ВИБРАЦИИ И ШУМЫ

Причинами магнитной вибрации и шума ЭМ являются пространственно-временные изменения сил магнитного взаимодействия между статором и

ротором, которые обусловлены основным магнитным полем в воздушном зазоре, дискретным распределением обмоток по пазам, зубчатостью статора и ротора, эксцентриситетом ротора и насыщением магнитной цепи. По направлению действия эти силы можно разделить на радиальные, тангенциальные и аксиальные (осевые) (рис. 13.10). Переменные силы, воздействуя на статор, вызывают упругую деформацию последнего, которая передается в окружающую воздушную среду в виде шума.

Аксиальные силы вызывают периодическое распушение и сжатие пакетов шихтованной стали ЭМ, сопровождаемые в некоторых случаях шумом высокой тональности. Качественное закрепление пакетов стали, надежная опрессовка и сжатие их торцевыми кольцами могут обеспечить монолитность сердечника и тем самым практически исключить влияние аксиальных магнитных сил.

Тангенциальные магнитные силы в трехфазных симметричных машинах вызывают колебания зубцов. Эти колебания можно рассматривать как колебания призматических стержней, у которых один конец жестко закреплен. Колебания зубцов обычно сильно демпфируются обмотками и клиньями в пазах. По этой причине тангенциальными вибрациями зубцов обычно пренебрегают. Однако в однофазных ЭМ, а также в ЭМ, питаемых несимметричным или несинусоидальным напряжением, тангенциальные электромагнитные силы необходимо учитывать, так как они могут вызывать радиальную вибрацию статора. Следует учитывать эти силы и вызываемые ими вибрации и в ЭМ постоянного тока.

Причиной магнитного шума может быть также и магнитострикция в крупных ЭМ переменного тока. Однако в ЭМ мощностью до 100 кВт влиянием магнитострикции обычно пренебрегают.

Таким образом, наибольшее влияние на магнитный шум и вибрацию оказывают радиальные магнитные силы, определяемые по выражению

$$F_r(\alpha, t) = B_\delta(\alpha, t) / 2 \mu_0,$$

где B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре; μ_0 — магнитная постоянная; α — расчетный коэффициент полюсной дуги.

Магнитное поле в воздушном зазоре ЭМ имеет сложный гармонический состав. В общем виде его можно описать выражением

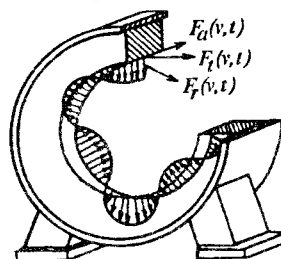


Рис. 13.10. Действие возмущающих магнитных сил (радиальных F_r , тангенциальных F_t и аксиальных F_a) на статор электрической машины

$$B_g(\alpha, t) = B_1(\alpha, t) + \sum_{\nu} B_{\nu}(\alpha, t) + \sum_{\mu} B_{\mu}(\alpha, t),$$

где B_1 — основная гармоника магнитной индукции; B_{ν}, B_{μ} — высшие гармоники магнитной индукции, обусловленные статором и ротором, соответственно: $\nu = 6i + 1$, $i = \pm 1, \pm 2, \dots$; $\mu = j(Z_2/p) + 1$, $j = \pm 1, \pm 2, \dots$; Z_2 — количество пазов ротора; p — количество пар полюсов.

Высшие гармоники магнитной индукции определяются распределением обмоток по пазам, зубчатостью статора и ротора, эксцентриситетом ротора, насыщением и несимметрией магнитной цепи, несимметрией и несинусоидальностью питающего напряжения.

Амплитуда деформации статора в значительной степени зависит от характера колебательного процесса и может иметь самые разнообразные порядки (моды). Наибольшую вибрацию и шум вызывают колебания низких порядков (от 1 до 4). Большое влияние на вибрацию и шум оказывают резонансные свойства статора, так как при совпадении частоты возбуждения с собственной частотой наступает резонанс колебаний, сопровождающийся резким увеличением вибрации и шума.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Традиционной формой представления выражения для расчета частот собственных колебаний

является формула для определения изгибных колебаний свободного кольца

$$f_m = \frac{D_r}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m_R}},$$

где

$$D_r = r(r^2 - 1)/\sqrt{r^2 + 1};$$

C, m_R — жесткость и масса кольца; r — порядок деформации.

При радиальных опорах частоты собственных колебаний статора

$$f_a = \frac{\lambda_a}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m_R}},$$

где значение λ_a при симметричных колебаниях определяется из выражения

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2}{k^2 + 1} \frac{\cos^2 k\Theta}{D_k^2 - \lambda^2} = 0$$

и при кососимметричных колебаниях из выражения

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^2}{k^2 + 1} \frac{\sin^2 k\Theta}{D_k^2 - \lambda^2} = 0.$$

Результаты решения уравнений представлены в табл. 13.4.

Из приведенных выше уравнений следует, что

Т а б л и ц а 13.4

Численные значения частот собственных колебаний

Θ , град	$a = 2$	$a = 3$	$a = 4$	$a = 5$	$a = 6$	$a = 7$	$a = 8$
Симметричные колебания							
100	0,374	6,561	11,465	20,503	32,766	41,623	62,934
105	0,584	5,895	12,934	18,794	34,084	41,924	59,539
110	0,825	5,278	14,314	17,728	33,010	43,557	57,22
114	1,112	4,728	14,361	18,723	30,561	47,733	55,275
120	1,466	4,253	13,427	21,331	28,603	46,394	60,072
125	1,909	3,864	12,372	23,463	28,432	42,447	63,49
130	2,418	3,625	11,402	22,86	31,368	41,518	57,857
135	2,683	3,913	10,495	21,385	33,838	44,607	53,085
140	2,551	4,991	9,782	19,946	33,177	47,593	56,679
145	3,344	6,625	9,286	18,609	31,202	46,614	62,089
150	2,151	7,589	10,597	17,452	29,307	42,907	62,603
155	1,987	7,289	14,087	17,723	27,7272	40,642	59,118
160	1,851	6,842	14,362	23,127	29,116	42,093	53,991
165	1,743	6,419	13,641	23,147	34,525	46,584	59,057
Кососимметричные колебания							
100	2,414	5,029	12,762	21,214	30,542	46,836	56,129
105	2,199	5,667	11,722	23,058	28,917	47,144	57,29
110	1,994	6,455	10,802	23,357	29,44	44,375	59,767
115	1,811	7,241	10,374	21,974	32,504	41,653	64,368
120	1,651	7,589	10,59	20,474	34,524	42,33	59,572
125	1,512	7,348	11,974	19,199	33,324	46,334	57,606
130	1,39	6,896	13,696	18,444	31,311	47,35	61,981
135	1,282	6,43	14,552	19,472	29,405	45,138	64,118
140	1,187	5,998	14,115	22,451	28,755	42,78	61,831
145	1,104	5,604	13,364	23,491	32,151	42,099	56,081
150	1,133	5,241	12,557	22,615	34,522	45,546	53,67
155	0,973	4,914	11,814	21,394	33,479	47,473	60,367
160	0,925	4,635	11,167	20,219	31,751	45,729	63,743
165	0,888	4,415	10,592	19,234	30,303	43,887	61,433

для определения частоты собственного колебания можно получить выражение

$$f_a = \frac{\lambda_a}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{R_0 m_0 + R_1 m_1}}; \quad C_0 = \frac{E_0}{R_0^3} \frac{l_0 h_0^3}{12};$$

$$C_1 = \frac{E_1}{R_1^3} \frac{l_1 h_1^3}{12},$$

где $C_0(C_1)$ — жесткость статора (корпуса); $E_0(E_1)$ — модуль упругости материала статора (корпуса); $h_0(h_1)$ — высота спинки статора (корпуса); $l_0(l_1)$ — длина статора (корпуса); $R_0(R_1)$ — средний радиус по спинке статора (корпуса); $m_0(m_1)$ — масса статора (корпуса), причем для статора $m_0 = \gamma \gamma_0 / q (h_0 l_0)$; γ — отношение массы статора с обмоткой к массе спинки статора; γ_0 — удельная плотность материала статора; q — ускорение свободного падения; для корпуса $m_1 = \gamma_1 / q (h_1 l_1)$; γ_1 — удельная плотность материала корпуса.

Исследуя колебания кольцевых пластин с нагруженным внешним контуром и разгруженным внутренним, что соответствует подшипниковому щиту, получим частоту собственных колебаний подшипникового щита

$$f_{\text{щ}} = \frac{h_{\text{щ}} k_0^2}{\pi D_{\text{щ.н}}^2} \sqrt{\frac{E_{\text{щ}}}{3(1 - \mu_{\text{щ}}^2) m_{\text{щ}}}},$$

где $h_{\text{щ}}$ — толщина щита; $D_{\text{щ.н}}$ — наружный диаметр щита; $k_0 = \frac{D_{\text{щ.н}}}{B_{\text{щ.н}}}$; E , μ , m — коэффициенты, характеризующие материал щита.

Схема колебаний прямоугольной пластины, которая закреплена одним краем, моделирует лапы ЭМ. Частоты собственных колебаний лап определяются

$$f_l = \frac{1}{2\pi} \frac{f(\alpha)}{r_l^2} \sqrt{\frac{E_l J_l}{F_l \rho_l}},$$

где F_l — площадь поперечного сечения боковых лап; r_l — радиус боковых сечений лап; J_l — момент инерции лап; $f(\alpha)$ — зависимость частоты собственных колебаний от угла расположения опор.

Способы уменьшения магнитной вибрации и шума весьма разнообразны и в различных вариантах применяются в ЭМ всех типов. Так, для асинхронных двигателей важное значение имеет правильный выбор количества пазов статора и ротора.

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ПАЗОВ НА ВИБРАЦИЮ И ШУМ

Общепринятыми являются следующие правила выбора количества пазов: для двухполюсных электродвигателей необходимо, чтобы $|k_1 z_1 + k_2 z_2 + \tau| \geq 4$, где $k_1, k_2 = \pm 1, \pm 2$; $\tau = 0$ или 2, для многополюсных двигателей $z_2 = z_1 + k \cdot 2p$, где $k = \pm 1; \pm 2$ — для четырехполюсных и $k = 0, \pm 1; \pm 2$ — для шести—восьмиполюсных двигателей.

Т а б л и ц а 13.5
Рекомендуемое количество пазов
статора и ротора z_1/z_2

Высота оси вращения, мм	Количество полюсов			
	2	4	6	8
56—63	24/22	24/22	36/33	—
71—100	24/22	36/34, 36/32	36/33	36/33
112—132	36/28	48/44	54/51	48/44
160	36/34 (36/28)	48/44 (48/39)	54/51 (54/65)	48/44
180	36/34 (36/28)	48/44 (48/39)	72/66 (72/55)	72/56 (72/55)
200	36/34 (36/28)	48/44 (48/38)	72/66 (72/58)	72/56 (72/58)
225	36/34 (36/28)	48/44 (48/38)	72/66 (72/58)	72/56 (72/58)
250	48/46 (48/40)	60/56 (60/50)	72/66 (72/58)	72/56 (72/58)

П р и м е ч а н и е. Значения в скобках требуют дополнительной экспериментальной проверки.

Наиболее благоприятные соотношения количества пазов статора и ротора приведены в табл. 13.5.

Расчет спектра электромагнитных вибровозмущающих сил производится с учетом номера статорных гармоник незубцового порядка $\nu = \frac{6}{d} k_1 + 1$, где d — целое положительное число, определяемое из условия $q = C_q / d$; k_1 — целое число, включая 0, кроме $k_1 = \pm C_q; \pm 2C_q$...

Номер статорной гармоники зубцового порядка, (если $k_1 = \pm n_1 C_q$) $\nu_z = k_1' \frac{Z_1}{p} + 1$; $k_1' = n_1 = \pm \frac{k}{C_q}$, причем k_1' — целое число.

Номер гармоники, обусловленной распределением обмотки по пазам и переменной магнитной проводимостью,

$$\mu = k_2 Z_2 / p + \nu,$$

где $k_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots$; ν — я гармоника.

При проведении оценочных расчетов достаточно принять $\nu = 1$. Номер гармоники, обусловленной эксцентриситетом,

$$\mu_{\pm 1, 2} = k_1 \frac{Z_2}{p} + \frac{p \pm a}{p},$$

где $a = 1, 2, 3, 4, 5$, при проведении оценочных расчетов достаточно принять $a = 1$.

Номер гармоники, обусловленной насыщением,

$$\mu_n = k_2 Z_2 / p + 3; f_r = f_0 (k_2 \frac{Z_2}{p} + 2), \quad \text{если}$$

$r = \mu + \nu$; $f_r = f_0 k_2 Z_2 / p$, если $r = \mu - \nu$. Следует иметь в виду, что при расчете порядка r участвуют статорные и роторные гармоники, обусловленные распределением обмотки по пазам, переменной магнитной проводимостью, эксцентриситетом, насыщением.

ПОДШИПНИКОВАЯ ВИБРАЦИЯ И ШУМ

Динамические процессы, происходящие в подшипниковых узлах, зависят от конструктивных особенностей подшипниковых узлов и от внешних воздействий на элементы подшипников.

Основные причины подшипниковой вибрации и шума можно разделить на три группы: погрешности изготовления, погрешности сборки и недостатки эксплуатации. К первой группе можно отнести такие погрешности, как волнистость беговых дорожек колец, их шероховатость, отклонения форм тел качения, их размерность, погрешности изготовления сепаратора. Ко второй группе следует отнести перекосы колец подшипников, подшипниковых щитов, погрешности выполнения болтовых соединений, несоосность, некруглость. К третьей группе относятся загрязнение и недостаточное (или, наоборот, избыточное) количество смазки, эксцентричная нагрузка на корпус подшипника.

Отклонения размеров и форм деталей в подшипниковых узлах ведут к возникновению низкочастотных составляющих вибрации.

Так, например, разностенность колец вызывает вибрацию с частотой $f_{1n} = n/60$, где n — частота вращения вала.

Овальность внутренних колец является источником вибрации с двойной частотой вращения.

Смещение сепаратора, следовательно его неуравновешенность, вызывает вибрации с частотой вращения сепаратора $f_{2n} = \frac{D_0 - d_{ш}}{2D_0} \frac{n}{60}$, где D_0 — диаметр окружности расположения центров тел качения; $d_{ш}$ — диаметр тел качения.

Отклонения в размерах тел качения и периодическое изменение жесткости подшипника при перекачивании тел качения вызывает вибрации с частотой $f_{3n} = \frac{D_0 - d_{ш}}{2D_0} \frac{n}{60} z$, где z — количество тел качения.

Частота вибрации, обусловленная наличием граней у тел качения, $f_{4n} = \frac{D_0^2 - d_{ш}^2}{2D_0 d_{ш}} \frac{n}{60} zk$, где k — количество граней на поверхности шарика или ролика. Дефекты рабочих поверхностей внутренних и внешних колец приводят к появлению

вибрации с соответствующими частотами, определяемыми, как и в предыдущем случае, но под k понимается количество дефектов на рабочей поверхности соответственно внутреннего или внешнего кольца.

При выборе подшипников качения следует иметь в виду, что с увеличением размеров и серии подшипников (увеличение на одну ступень по диаметру) на 1—2 дБ(А) возрастает уровень его вибрации. При одинаковых размерах роликовые подшипники вызывают большую вибрацию, чем шариковые. Целесообразно применять осевое поджатие на наружное кольцо подшипника, значение которого устанавливается экспериментально. Подшипниковые камеры необходимо заполнять смазкой примерно на 50% их объема. Сборку и разборку подшипниковых узлов необходимо производить без ударов.

Уровни виброускорения (вибрации) и шума в значительной степени зависят от диаметра (номера) подшипника (рис. 13.11). При изготовлении ЭМ с еще более низкими уровнями вибрации и шума целесообразно применять подшипники скольжения.

ВИБРАЦИЯ И ШУМ
ЩЕТОЧНО-КОЛЛЕКТОРНОГО УЗЛА

Источником радиальных колебаний щетки могут быть нарушение формы поверхности коллектора, выступание одной или группы коллекторных пластин и ударные взаимодействия щетки с пластинами коллектора, разделенными межламельной изоляцией.

В щеточно-коллекторных узлах, содержащих коробчатый щеткодержатель, колебания щетки и шум возникают также вследствие трения и ударов щетки о щеткодержатель.

Исследование вибрации щеточно-коллекторного узла проводится с использованием двух расчетных схем: дискретной и с распределенными параметрами. Дискретная схема соответствует случаю, когда масса щетки значительно больше массы прижимной пружины. Схема с распределенными параметрами вводится, если масса щетки соизмерима с массой пружины.

Кроме названных выше причин колебания щетки, возможны тангенциальные колебания щеток, по своей природе не отличающиеся от весьма

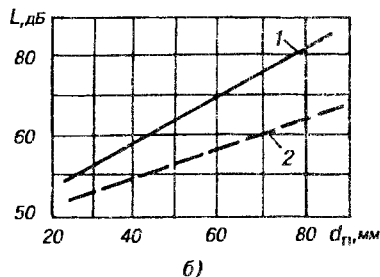
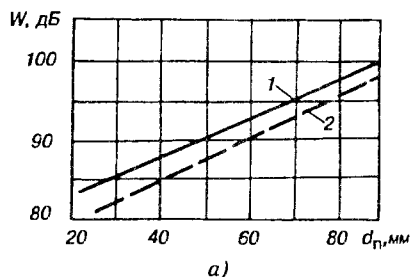


Рис. 13.11. Уровни виброускорения (а) и шума (б) в зависимости от диаметра подшипников при $n = 1500$ об/мин: 1 — серия 300; 2 — серия 200

распространенных фрикционных автоколебаний. Причиной возникновения этих автоколебаний является наличие разности статического и кинематического коэффициентов трения по поверхности коллектора или кольца.

Для уменьшения вибрации и шума щеточно-коллекторного узла рекомендуется:

1) уменьшить диаметр коллектора (уменьшение виброскорости щетки);

2) увеличить количество коллекторных пластин. При этом изменяется коллекторная частота, что позволяет при необходимости осуществить настройку этой частоты от частоты собственных колебаний узла;

3) уменьшить массу щетки;

4) уменьшить зазор между краем коробки щеткодержателя и поверхностью коллектора или кольца;

5) повысить жесткость закрепления коллекторных пластин. Отклонение от правильной геометрической формы не должно превышать 2—3 мкм, а выступов пластин не должно быть;

6) расположить щетки под углом 2—4° по направлению вращения, что исключит их тангенциальные автоколебания, вызывающие шум в виде свиста.

ШУМ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Главная составляющая магнитного шума силовых трансформаторов возникает от магнитострикции. Основная частота ее равна удвоенной частоте напряжения сети. Опыт показывает, что с увеличением магнитной индукции увеличивается шум. Возрастание шума происходит достаточно равномерно, примерно 1—3 дБ на 0,1 Тл. Уровень шума трансформатора при нагрузке превышает уровень шума при холостом ходе на 5—15 дБ. При соединении обмоток трансформаторов по схеме Y/Δ уровень шума на 5—6 дБ ниже, чем при соединении Y/Y . Шум трансформатора возрастает с увеличением высоты магнитопровода.

Одновременно с магнитострикционным шумом возникает шум от поперечных вибраций листов стали магнитопровода, возникающих под воздействием переменного магнитного поля. Основная частота его также равна удвоенной частоте напряжения сети. Уровень шума в этом случае может значительно возрасти при недоброкачественной сборке сердечника, плохой прессовке части или всех пластин магнитопровода, ошибке в раскладке листов стали по стержням и ярмам, попадании в сердечник листов с отогнутыми краями и другими дефектами, создающими зазоры между пластинами и приводящими к неравномерности сжатия пластин магнитопровода.

Магнитострикционная сила, действующая на магнитопровод, определяется из уравнения:

$$P_M = \frac{n a_M}{2} B_a^2 Q \cos 2 \omega t,$$

где n — количество окон, а не стержней, так как в крайних стержнях магнитный поток вдвое меньше; Q — площадь поперечного сечения магнитопрово-

Т а б л и ц а 13.6

Магнитострикционная постоянная

Материал	$a_M, 10^6 \text{ Н}/(\text{м}^2 \cdot \text{Тл}^2)$
Никель	4,0
Альфер	8,0
Гиперник	8,6
Пермаллой-40	8,7
Сплав	2,9
Железобальтовый сплав	3,2
Электролитическое железо	4,0
Гиперко	6,3
Пермендюр	6,1

П р и м е ч а н и е. Магнитострикционную постоянную для электротехнической стали принимают как среднее значение для электромагнитных материалов — $6 \cdot 10^6 \text{ Н}/(\text{м}^2 \cdot \text{Тл}^2)$.

да; a_M — магнитострикционная постоянная (см. табл. 13.6).

13.3. ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ РАДИОПОМЕХИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Борьба с промышленными радиопомехами (ИРП) в странах с развитой промышленностью приобретает все большую значимость в связи с двумя ведущими тенденциями, обусловленными научно-техническим прогрессом:

повышением энерговооруженности всех отраслей промышленности, транспорта, сельского хозяйства, быта;

стремительным развитием радиоэлектроники и вычислительной техники, сопровождаемым повышением требований к чувствительности радиоэлектронных средств (РЭС), устойчивости их работы, массогабаритным показателям, позволяющим размещать РЭС в непосредственной близости с энергетическими и другими установками.

Вопросы изучения, регламентации и подавления ИРП рассматриваются различными техническими комитетами Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международным специальным комитетом по радиопомехам (МСКР) и соответствующими службами страны.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Индустриальная радиопомеха — электромагнитные и электрические возмущения, препятствующие правильному приему полезного сигнала. Под радиопомехой понимается электромагнитная помеха в диапазоне радиочастот; к ИРП не относятся помехи, создаваемые ВЧ-трактами радиопередатчиков.

Длительная (непрерывная) индустриальная радиопомеха — ИРП, длительность которой, измерения в регламентированных условиях, не менее 1 с.

Кратковременная промышленная радиопомеха — ИРП, длительность которой, измеренная в регламентированных условиях, не более 0,2 с.

Источник ИРП — устройство, создающее ИРП в окружающих его электрических сетях, конструкциях, пространстве.

Помехообразующий элемент — элемент источника ИРП, непосредственно участвующий в ее создании.

Рецептор — устройство, на которое ИРП может оказывать мешающее воздействие.

Квазипиковое значение напряжения ИРП — значение напряжения ИРП, оцененное с помощью измерителя ИРП с квазипиковым вольтметром.

Измеритель ИРП — селективный микровольтметр, для которого регламентировано отношение синусоидального напряжения к спектральной плотности напряжения импульсов на входе, вызывающих одинаковое показание измерительного прибора, содержащий инерционные детекторы и позволяющий измерять напряжение, напряженность поля, ток и мощность при использовании дополнительных устройств.

Эквивалент сети — устройство, используемое при измерении радиопомех, включаемое в сеть питания источников ИРП для создания регламентированного сопротивления нагрузки на частоте измерения.

Поглощающие клещи — устройство, предназначенное для измерения мощности ИРП, состоящее из трансформатора тока и магнитопровода, охватывающее провод питания электроустройства и перемещаемое вдоль него при измерениях.

Токоъемник для измерения тока ИРП — устройство, содержащее магнитопровод с обмоткой, к которой подключается измеритель радиопомех, охватывающее токонесущий провод и перемещаемое вдоль него при измерениях.

Помехозащищенность устройства от ИРП — свойство устройства претерпевать при помощи экранов и фильтров проникновению ИРП в его тракт.

Нормы на ИРП — допускаемые значения напряжения, напряженности поля, тока и пересчитанные значения мощности ИРП, выраженные в децибелах относительно 1 мкВ, 1 мВ/м, 1 мА, 1 кВт, при статическом режиме работы и регламентированные в нормативно-технической документации.

Испытания на ИРП — определение соответствия ИРП требованиям, указанным в нормативно-технической документации.

Помехоподавляющий элемент — элемент, непосредственно осуществляющий подавление или перераспределение энергии помех (дрессель, конденсатор, резистор и т.п.).

Помехоподавляющее устройство — совокупность помехоподавляющих элементов, конструктивно объединенных в одно изделие.

Помехоподавляющий провод — помехоподавляющий элемент в виде провода с распределенным сопротивлением, обеспечивающий ослабление помех.

Помехоподавляющий конденсатор — помехоподавляющий элемент, имеющий в полосе рабочих частот емкостный характер полного сопротивления.

Помехоподавляющий дроссель — помехоподавляющий элемент, имеющий в полосе рабочих частот индуктивный характер полного сопротивления.

Полоса рабочих частот помехоподавляющего элемента — полоса частот, в которой вносимое затухание элемента не ниже заданного.

Вносимое затухание помехоподавляющего элемента (фильтра) — затухание, вносимое элементом (фильтром) при включении его в регламентированную схему.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИРП

Все источники ИРП в зависимости от причины их возникновения делятся на две группы:

устройства, в которых высокочастотные электромагнитные колебания необходимы для обеспечения их функционирования (высокочастотные генераторы промышленного, научного, медицинского и бытового назначения (ПНМ-установки); гетеродины радиовещательных и телевизионных приемников и т. д.);

устройства, в которых высокочастотные электромагнитные колебания являются паразитными и не имеют информационного или функционального содержания (троллейбусы, трамваи, электропоезда, тяговые подстанции электротранспорта и т.п., включая приборы, в которых имеются коллекторные электродвигатели или автоматические регуляторы, периферийные электромеханические устройства ЭВМ и т.д.

Из других механизмов образования ИРП наиболее распространенными являются следующие: коронирование элементов конструкций, имеющих высокий потенциал по отношению к окружающему пространству (например, в высоковольтных линиях электропередачи); частичные пробой изоляторов, находящихся под высоким напряжением, вследствие их загрязнения и наличия микротрещин; разряд в люминесцентных светильниках; многократные электрические пробой и дуга в сварочных аппаратах и токоъемных устройствах электротранспорта.

В качестве основной характеристики источников ИРП, определяющей их мешающее действие на большинство РЭС с аналоговыми сигналами, используется частотная характеристика математического ожидания измеренной величины $\mu\{20 \lg U_{\text{изм}}\}$.

Для оценки мешающего воздействия источников ИРП на рецепторы, использующие дискретные сигналы (ЭВМ, аппаратура передачи данных, импульсные управляющие устройства), кроме частотной характеристики $\mu\{20 \lg U_{\text{изм}}\}$ необходимо знание средней частоты следования импульсов помехи, значения которой для типичных источников представлены ниже:

Источник	Средняя частота следования импульсов, имп/с
Электродвигатель	$10^3 - 10^4$
Люминесцентная лампа	$10^4 - 10^5$
Автомобиль	10^3
Линия электропередачи	$10^4 - 10^5$
Сварочный аппарат	$10^4 - 10^5$
Трамвай, троллейбус на выбеге (токоосъем)	$3 (10^2 \div 10^3)$
Телевизионный приемник	$1,5 \cdot 10^4$

Средой распространения ИРП является сочетание пространственной решетки электрических сетей, конструкций и свободного пространства.

Основной параметр среды распространения ИРП — коэффициент переноса помех K_{Π} , характеризующий затухание помехи при распространении из заданных точек вблизи источника помех до точек на «входе» рецептора, измеренная по регламентированной схеме. В общем случае K_{Π} является случайной величиной, статистические характеристики которой расчету не поддаются и определяют экспериментально. Распределение вероятностей K_{Π} в большинстве случаев логарифмически нормальное. Среднеквадратичное отклонение для однотипных условий (например, для морского судна или жилого района с однотипной застройкой и одного вида источника помех) составляет $\sigma \{20 \lg K_{\Pi}\} = 12 \div 15$ дБ. В тракте радиоприемного устройств (РПУ) ИРП могут попадать следующими основными путями: а) по сети питания РПУ; б) при воздействии на антенну электрического, магнитного или электромагнитного полей, создаваемых помехоносителями цепями; в) при воздействии перечисленных в п. «б» полей на фидеры антенны; г) при воздействии перечисленных в п. «б» полей на высокочастотные контуры РПУ; д) по контуру заземления РПУ и последующей наводкой на высокочастотные каскады приемника вследствие гальванических, емкостных и магнитных связей.

Для проводных средств связи, контроля управления ЭВМ основными путями проникновения ИРП в аппаратуру являются:

наводка электромагнитным полем на несимметричные (или плохо отсимурированные) соединительные пары и магнитные элементы запоминающих устройств;

воздействие помех через сеть питания и контур заземления.

Основной характеристикой помехозащищенности рецепторов по отношению к узкополосной непрерывной помехе является частотная характеристика максимального значения помехи, вводимой в рецептор по регламентированной схеме и не вызывающей недопустимого искажения сигнала. Помехозащищенность по отношению к импульсной помехе характеризуется одной величиной — максимальной амплитудой импульсов, соответствующей допускаемому ухудшению работы рецептора. Схема ввода помехи при испытаниях и ее спектральная характеристика или параметры модуляции оговариваются в нормативно-технической документации.

Совокупность трех характеристик — помех отдельных электроустройств, коэффициентов переноса помех и помехозащищенности рецепторов — служит исходным материалом для нормирования ИРП.

13.4. НОРМИРОВАНИЕ ИРП

Нормы на допускаемые уровни ИРП носят статистический характер. Это означает, что нормируется совокупность статистических параметров $\mu \{20 \lg U_{\text{изм}}\}$, $\sigma \{20 \lg U_{\text{изм}}\}$ так, чтобы с определенной надежностью обеспечивалась качественная работа рецепторов при наличии источников ИРП.

Для расчета нормы ИРП используется соотношение $R = U_c - U_{\text{изм}} + K_{\Pi}$, где R , U_c , $U_{\text{изм}}$ и K_{Π} — отношение сигнал — помеха, эффективное значение напряжения сигнала на входе рецептора, измеренное квазипиковое значение нормируемой величины помехи на «источнике» и коэффициент переноса ИРП соответственно.

Нормируется квантиль $U_{\text{изм}}(p)$ в распределении вероятностей значения $U_{\text{изм}}$, соответствующий условию выбранной вероятности p . Значение нормы L ИРП выбирается таким, чтобы при $U_{\text{изм}}(p) = L$ обеспечивалась заданная надежность β работы рецептора с отношением $R \geq R_{\text{доп}}$ ($R_{\text{доп}}$ — допускаемое отношение сигнал/помеха):

$$L_{p, \beta}(U_{\text{изм}}) = \mu U_c + \mu K_{\Pi} - R_{\text{доп}} - t_{\beta} \sqrt{\sigma_{U_c}^2 + \sigma_{K_{\Pi}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2} + t_p \sigma_{U_{\text{изм}}}.$$

где $t_{\beta} = \Phi^{-1}(\beta)$; $t_p = \Phi^{-1}(p)$ — аргументы функции нормального распределения.

При нормировании ИРП принимают $p = 0,8$, соответственно $t_p = 0,84$. Это означает, что в партии изделий, точно соответствующей норме $[U_{\text{изм}}(p) = L]$, 80 % изделий создает уровень ИРП $U_{\text{изм}}$, не превышающий L .

Значение β выбирается в интервале 0,8—0,99 в зависимости от требований к надежности функционирования рецепторов. $\beta = 0,95$ означает, что при включении любого источника помех из группы (партии), удовлетворяющей норме, для рецептора, находящегося в зоне действия источника помех, с вероятностью не меньше 0,95 будет выполняться условие $R \geq R_{\text{доп}}$. В подкоренном выражении $\sigma_{K_{\Pi}}$

имеет наибольшее значение. Уменьшение $\sigma_{K_{\Pi}}$ снижает норму на $U_{\text{изм}}$. Поэтому расчет норм ведется для оборудования, размещаемого в однотипных условиях относительно рецепторов. Так, в целях защиты приема сигналов радиовещания и телевидения в жилых зданиях нормы на ИРП разрабатываются отдельно для оборудования, размещаемого в жилых зданиях и вне жилых зданий.

Оборудование по экономическим соображениям и условиям удаления от рецепторов разделяется на подгруппы: линии электропередачи, электро-транспорт, автомобили, промышленное оборудование и т.п.

Среднеквадратичные отклонения составляют:
 $\sigma_{K_n} = 12 \text{ дБ}$, $\sigma_{U_{\text{изм}}} = 6 \text{ дБ}$.

Если в качестве защищаемого сигнала принимается номинальный или минимальный гарантированный сигнал, то $\sigma_{U_c} = 0$.

Ориентировочные значения $R_{\text{доп}}$ для обеспечения удовлетворительного качества радиовещательного и телевизионного приема равны: 26 дБ для радиовещательного приема частотно-модулированных сигналов; 30—35 дБ для радиовещательного приема амплитудно-модулированных сигналов; 40—45 дБ для телевизионного приема.

На протяжении 1983—1991 гг. разработан и утвержден ряд нормативных документов на помехозащищенность радиоэлектронной аппаратуры: Нормы 21-86 ГКРЧ СССР на помехозащищенность бытовой радиоэлектронной аппаратуры; Нормы 22-86 на помехозащищенность радиоприемников дециметрового диапазона волн и др. Выполнение норм обеспечивает необходимую защиту радиоэлектронной аппаратуры как от ИРП, так и от полей радиостанций.

13.5. ИСПЫТАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИРП

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Испытания изделий на соответствие нормам и стандартам на допускаемые ИРП проводятся согласно ГОСТ 16842-82, нормам и стандартам на соответствующие группы источников ИРП и др.

Испытаниям подлежат серийно выпускаемые устройства и опытные образцы устройств. Испытания проводят в специально оборудованных местах и в необходимых случаях в условиях эксплуатации.

Испытания серийно выпускаемых устройств проводят службы технического контроля предприятия-изготовителя.

Испытания устройств, находящихся в эксплуатации, проводят предприятия, эксплуатирующие эти устройства.

Устройства единичного выпуска испытывают каждое в отдельности.

УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЯ

Испытания проводят на специальных стендах, оборудованных поворотными устройствами, общим контуром заземления, измерительной аппаратурой, измерительными устройствами.

Выбор места размещения стенда определяется условием: на частоте измерения уровень посторонней помехи, измеренный при выключенном источнике ИРП, должен быть не менее чем на 10 дБ ниже нормы. Основной вариант размещения стенда для контроля напряженности поля ИРП — измерительная площадка. К ней предъявляются требования в соответствии с ГОСТ 16842-82. Подвод электрического питания от сети к испытуемым изделиям и к измерителю помех должен осуществляться кабелем, проложенным в земле, при этом щит коммутации кабеля располагается возможно дальше от границы площадки.

В случаях, когда уровни посторонних радиопомех не позволяют проводить испытания на открытой измерительной площадке, разрешается размещать стенд в безэховой камере с соблюдением определенных метрологических требований, оговоренных в нормах.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Основным измерительным прибором, используемым при контроле ИРП, является стандартный измеритель ИРП, технические данные которого отвечают требованиям ГОСТ 11001-80 «Приборы для измерения промышленных радиопомех».

Госстандартом разрешены для применения следующие измерители ИРП на разные полосы частот: NLMZ-4—10 ÷ 150 кГц, FSM-6—0,15 ÷ 30 МГц; FSM-11—10 кГц ÷ 30 МГц; ULMZ—30 ÷ 300 МГц; FSM-8—30 ÷ 1000 МГц; DLMZ—300 ÷ 1000 МГц.

В оперативных полевых измерениях вместо измерителей ИРП применяются измерители-искатели радиопомех, обладающие меньшими габаритами BSM301—0,15 ÷ 30 МГц и BSM401—30 ÷ 300 МГц.

Для контроля кратковременных ИРП на выход промежуточной частоты измерителя ИРП подключается специальный прибор: анализатор кратковременных ИРП, осуществляющий временной анализ выбросов огибающей процесса ИРП, регламентированных Нормами 4-87.

ОБРАБОТКА И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Соответствие продукции требованиям стандартов или норм на ИРП устанавливают на каждой частоте в отдельности.

Исходя из методики задания норм для оценки продукции на соответствие норме необходимо сравнить с L следующую величину: $\mu_{U_{\text{изм}}} + t_p \sigma_{U_{\text{изм}}}$.

Однако продукция проходит испытания выборочно, и размеры выборки n ограничены исходя из экономических соображений. Ограниченность выборки не позволяет получить точные значения параметров $\mu_{U_{\text{изм}}}$, $\sigma_{U_{\text{изм}}}$. По результатам измерений вычисляют $\mu_{U_{\text{изм}}}^*$ и $\sigma_{U_{\text{изм}}}^*$:

$$\mu_{U_{\text{изм}}}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 20 \lg U_{\text{изм} i};$$

$$\sigma_{U_{\text{изм}}}^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [20 \lg U_{\text{изм} i} - \mu_{U_{\text{изм}}}^*]^2}.$$

В качестве условия приемки партии принимаетс я выполнение неравенства: $\mu_{U_{\text{изм}}}^* + k \sigma_{U_{\text{изм}}}^* \leq L$.

При этом существует некоторый риск браковки кондиционной партии α (риск изготовителя) и риск приемки некондиционной партии $1 - \alpha$ (риск потребителя). Конкретные значения k в зависимости от n и α определяются по таблицам нецентрального t -распределения. В настоящее время в нормативных документах приняты значения k ,

соответствующие риску потребителя $\alpha = 0,2$ и риску изготовителя соответственно $\alpha = 0,8$.

Равнозначные результаты контроля партии получают при процедуре контроля по доле «дефектной» продукции, основанной на биномиальном законе распределения числа источников помех в случайной выборке n , для которых $(20 \times \lg U_{\text{изм } i}) > L$. В этом случае исходя из того же значения риска потребителя $1 - \alpha = 0,2$ оговаривается допустимое число таких источников помех в выборке (табл. 13.7). Такая же процедура применяется при контроле источников кратковременных ИРП, где фиксируется не уровень ИРП, а факт превышения нормы.

Т а б л и ц а 13.7

Допустимое число источников помех

Число испытанных устройств при		Допустимое число устройств, у которых значение радиопомех превышает нормируемое
$\alpha = 0,8$	$\alpha = 0,95$	
7	13	0
14	22	1
20	29	2
26	36	3
32	43	4
38	50	5

13.6. ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА

ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Основными помехоподавляющими элементами являются помехоподавляющие конденсаторы, дроссели, провода; помехоподавляющими устройствами — помехоподавляющие фильтры, экраны, экрани-

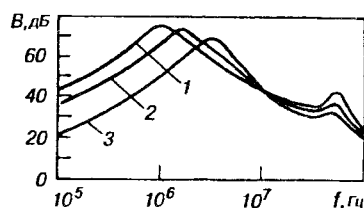


Рис. 13.12. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов типа К73-21:

1 — 10 мкФ; 2 — 2,2 мкФ, 250 В; 3 — 0,47 мкФ, 250 В

рованные камеры и помещения, устройства заземления.

В табл. 13.8 представлена номенклатура типовых помехоподавляющих конденсаторов, выпускаемых отечественной промышленностью.

Широкое распространение получили малогабаритные и надежные в эксплуатации металлоплёночные проходные некоаксиальные конденсаторы К73-21, предназначенные для подавления ИРП до частоты 100 МГц в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов. Частотные характеристики вносимого затухания конденсаторов К73-21 представлены на рис. 13.12, внешний вид — на рис. 13.13.

Конденсаторы К10-44 имеют высокие удельные массогабаритные показатели (среди керамических конденсаторов), что делает их перспективными для использования в малогабаритной аппаратуре. Характеристики вносимого затухания конденсаторов представлены на рис. 13.14, а, внешний вид — на рис. 13.13. Конденсаторы К53-17 отличаются высокой эффективностью в широкой полосе частот — от сотен герц до тысячи мегагерц (рис. 13.14, б).

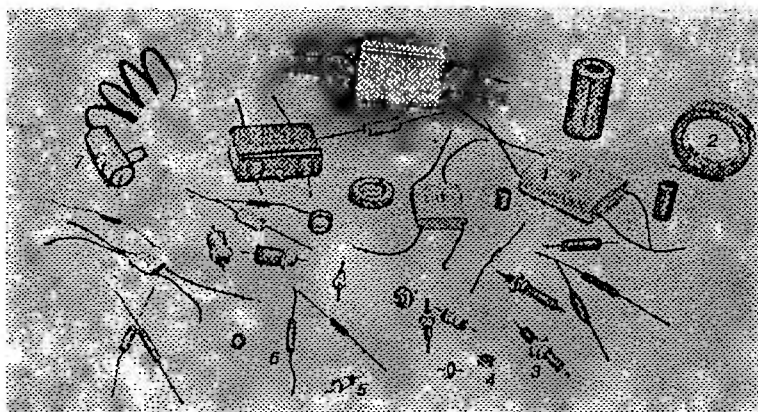


Рис. 13.13. Помехоподавляющие конденсаторы, дроссели, сердечники, фильтры:

1 — конденсатор К73-21; 2 — сердечник ПП-90; 3 — фильтр БЗ3; 4 — конденсатор К10-44; 5 — фильтр БЗБ; 6 — дроссель ДМ; 7 — фильтр Б15-2

Т а б л и ц а 13.8

Помехоподавляющие конденсаторы

Тип конденсатора	ТУ	Классификация	Максимальное напряжение, В	Емкость, мкФ	Максимальный проходной ток, А	Схема
К10У-1	ОЖО.460.052 ТУ	Проходной	350	0,00015—0,00033	—	
КТП	ОЖО.460.038 ТУ	»	2000	0,00033	10	
КТП-Е	ОЖО.460.032 ТУ	»	250	$8 \cdot 10^{-6}$ — 0,01	15	
К0-Е	ОЖО.460.032 ТУ	Опорный	250	$1,5 \cdot 10^{-5}$ — 0,0047	—	
К10-51	ОЖО.460.186 ТУ	Проходной	350	$3,9 \cdot 10^{-6}$ — 0,0047	10	
К10П-4	ОЖО.460.035 ТУ	»	350	$3,9 \cdot 10^{-6}$ — 0,0068	10	
КТПМ-1	ОЖО.460.112 ТУ	»	160	$6,8 \cdot 10^{-5}$	5	
К0-1	ОЖО.460.153 ТУ	Опорный	500	$6,8 \cdot 10^{-6}$ — 0,0047	—	
К10-54	ОЖО.460.199 ТУ	Проходной	350	$4,7 \cdot 10^{-6}$ — 6,8	—	
К50-33	ОЖО.464.222 ТУ	Четырехвыводной	160	470 — 22 000	—	
КЗ	ОЖО.462.026 ТУ	Защитный	500; 1600	0,1 — 1	—	
ЗБ	ОЖО.462.005 ТУ	»	250	0,022 — 1	20	
ОКП	ОЖО.462.096 ТУ	Проходной	125	0,047 — 0,22	40	
КБП	ОЖО.462.103 ТУ	»	500; 1600	0,022—2	70	
ОКБП	ОЖО.462.014 ТУ	»	500; 1600	0,022 — 2	42	
КБПС-Ф	ОЖО.462.096 ТУ	»	250	0,1 — 0,22	40	
ОБПТ	ОЖО.462.096 ТУ	»	50	0,22 — 1	300	
МБП	ОЖО.462.048 ТУ	»	36	2 — 10	600	
ОППТ	ОЖО.461.026 ТУ	»	50	0,1 — 0,25	60	
К73-18	ОЖО.461.113 ТУ	»	30	0,27	10	
К75-37	ОЖО.464.129 ТУ	Защитный	250	0,1 — 0,68	10	
К75-41	ОЖО.464.145 ТУ	»	250	0,228 — 0,5	—	
К75-42	ОЖО.464.152 ТУ	Проходной	1600	0,0047 — 10	160	
К75-43	ОЖО.464.153 ТУ	Защитный	1600	0,1 — 10	—	
К73-28	ОЖО.461.157 ТУ	Проходной	1600	0,022 — 2,2	100	
К73-27	ОЖО.461.145 ТУ	»	80	10	—	
К53-28	ОЖО.464.216	Защитный	40	15 — 470	—	
К73-21	ОЖО.461.147 ТУ	»	250; 500	0,1 — 10	10	
К75-П-4	ОЖО.464.19 ТУ	Опорный	500; 1000	0,022—1	—	

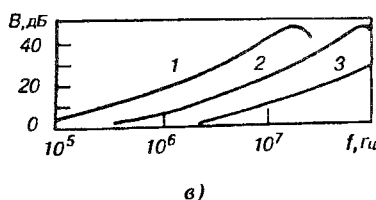
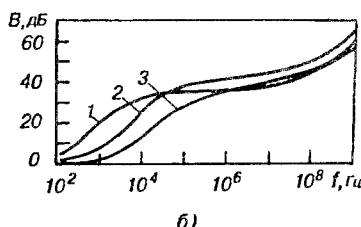
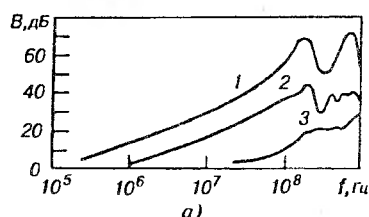


Рис. 13.14. Частотные характеристики вносимого затухания: конденсаторов типа К10-44 (а) 1 — 0,022 мкФ; 2 — 3000 пФ; 3 — 100 пФ; конденсаторов типа К53-17 (б): 1 — 68 мкФ, 6,3 В; 2 — 15 мкФ, 16 В; 3 — 2,2 мкФ, 6,3 В; дросселей типа ДМ (в): 1 — ДМ-0,1, 600 мкГн; 2 — ДМ-0,1, 50 мкГн; 3 — ДМ-3, 10 мкГн

ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ДРОССЕЛИ

При подавлении ИРП на частотах ниже 30 МГц применяют витковые дроссели (катушки на ферромагнитных сердечниках). В цепях с рабочими токами до 3 А рекомендуется использовать высокочастотные дроссели ДМ (ГИО-477.605 ТУ). Частотные характеристики вносимого затухания дросселей типа ДМ приведены на рис. 13.14, в. При токе более 3 А можно применять дроссели фильтров выпрямителей Д (ОЖО.475.013 ТУ), выполненных на броневых ленточно-разрезных сердечниках типа ШЛ. При токах 1—25 А применяют дроссели Д222, Д245, Д253, Д262 и Д270. В цепях с частотами питающей сети 5—50 кГц и

амплитудами пульсаций до 25 В применяют дроссели Д5 (ОЖО.475.020 ТУ).

Высокочастотное сопротивление виткового дросселя рассчитывается по формуле $Z_L = j\omega L + R / (j\omega C_n R - \omega^2 C_n L + 1)$, где L — индуктивность дросселя; R — активное сопротивление дросселя; C_n — паразитная межвитковая емкость.

При подавлении ИРП на частотах выше 50 МГц, особенно в цепях с рабочими токами выше 40 А, применяются безвитковые дроссели.

Для безвиткового дросселя сопротивление, Ом:

$$Z_L = [2\omega (\mu'' - j\mu') h \ln D/d] \cdot 10^{-10},$$

где μ'' — относительная вязкая магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника; μ' — относительная упругая магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника; h — длина сердечника, мм; D — внешний диаметр сердечника, мм; d — внутренний диаметр сердечника, равный диаметру токонесущего стержня, мм.

ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

В настоящее время отечественная промышленность выпускает несколько серий помехоподавляющих фильтров, основные данные которых приведены в табл. 13.9, внешний вид фильтров некоторых серий изображен на рис. 13.15.

Наиболее высокие удельные показатели достигаются в выпускаемых в настоящее время промышленностью керамических проходных фильтрах, построенных на основе дисковых многослойных сегнетокерамических конденсаторов и безвитковых ферромагнитных дросселей.

Основными разновидностями таких (фильтров) являются Г-образное и П-образное звенья. Емкость в таких звеньях может достигать до 10 мкФ и более, индуктивность 0,15 мкГн. Вносимое затухание в полосе частот 0,01—10 МГц не менее 10 дБ, в полосе частот 10—1000 МГц — не менее 60 дБ.

При необходимости ослабления помех в высокочастотных цепях в диапазоне СВЧ могут быть использованы отражательно-поглощающие фильтры типа ФПС.

При отсутствии серийно выпускаемых фильтров с требуемыми параметрами производится расчет и изготовление фильтров по индивидуальному проекту.

Вносимое затухание рассчитывается:

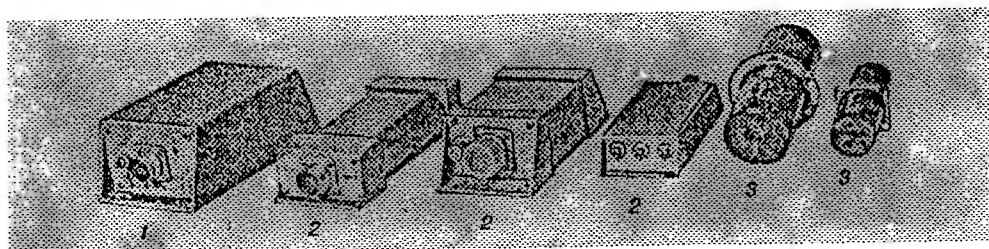


Рис. 13.15. Помехоподавляющие фильтры: 1 — ФПМД; 2 — Ф; 3 — Б15-3

Таблица 13.9
Помехоподавляющие фильтры

Тип фильтра	Частота рабочего тока, Гц	Рабочий ток, А	Номинальное напряжение, В			Полоса частот, МГц	Вносимое затухание, дБ	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			постоянного тока	частотой 50 Гц	частотой 400 Гц				
ФП-1	0—400	2,5	500	220	110	0,15—1000	60	350×100×60	2,5
ФП-2	0—400	4	250	110	65	0,15—1000	60	350×100×60	2,5
ФП-3	0—400	4	500	220	110	0,15—1000	60	430×150×80	4,5
ФП-4	0—400	4	1000	500	220	0,15—1000	60	430×150×80	4,5
ФП-5	0—400	10	500	220	110	0,15—1000	60	430×150×80	4,5
ФП-6	0—400	20	500	220	110	0,15—1000	60	430×150×80	4,5
ФП-7	0—400	1	250	110	60	0,15—1000	80	430×150×80	4,5
ФП-8	0—400	2,5	1000	500	220	0,15—1000	80	470×170×80	6
ФП-9	0—400	4	1000	380	110	0,15—1000	80	470×170×80	6
ФП-10	0—400	10	500	220	110	0,15—1000	80	470×170×80	6
ФП-11	0—400	16	1000	380	110	0,15—1000	100	560×210×80	8,5
ФП-12	0—400	20	500	220	110	0,15—1000	100	560×210×80	9,5
ФП-13	0—400	20	1000	500	220	0,15—1000	100	560×210×80	9,5
ФП-14	0—400	40	1000	500	220	0,15—1000	100	560×210×80	10
ФП-15	0—400	70	500	220	110	0,15—1000	100	800×210×150	25
ФП-24	0—400	2,5	500	220	115	0,15—1000	80	280×85×60	1,8
ФБ-2М	0—400	3	250	250	250	10—10 000	80	325×70×72	1,5
ФБ-2Т	0—400	0,1	250	60	60	10—10 000	80	420×70×72	3
ФБ-3М	0—400	50	500	220	115	5—10 000	80	Ø160×450	10
ФБ-4М	0—400	100	500	220	115	5—10 000	80	Ø245×500	20
Ф1-2-0,1	0—50	0,1	—	220	—	0,5—500	90	63×52×21	0,13
Ф2-2-0,4	0—50	0,4	—	220	—	0,5—600	90	63×52×28	0,16
Ф3-3-0,4	0—50	0,4	—	220	—	50—200	70	120×52×22	0,26
Ф4-3-1,0	0—50	1	—	220	—	50—200	70	120×52×27	0,29
Ф5-3-2,0	0—50	2	—	220	—	80—1000	70	120×52×27	0,29
Ф6-2-5,0	0—50	5	—	220	—	0,1—500	90	194×134×73	1,55
Ф7-3-5,0	0—50	5	—	220	—	0,1—500	90	218×196×73	2,25
Ф8-4-5,0	0—50	5	—	220	—	0,1—500	90	194×258×73	2,94
Ф9-2-10	0—50	10	—	220	—	2—300	80	140×68×46	0,49
Ф10-4-10	0—50	10	—	220	—	2—300	80	167×123×47	0,85
Ф11-2-63	0—50	63	—	220	—	0,5—600	80	228×134×73	1,5
Ф12-4-63	0—50	63	—	220	—	0,5—600	80	228×134×73	2,84
Ф13-1-0,1	0—50	0,1	—	220	—	1—400	80	60×80×12	0,04
Ф14-1-0,4	0—50	0,4	—	220	—	1—400	80	50×23×62	0,07
Ф15-1-1,0	0—50	1	—	220	—	1—400	80	51×25×63	0,07
Ф16-1-2,0	0—50	2	—	220	—	1—400	80	53×27×65	0,08
ФПМ-Д1	0	1	50	—	—	0,01—1000	70	190×82×56	1,3
ФПМ-Д2	0	1	50	—	—	0,01—1000	70	200×82×56	1,3
ФПМ-Д3	0	1	50	—	—	0,01—1000	45	170×82×56	1,2
ФПМ-Д4	0	5	50	—	—	0,01—1000	70	214×134×80	2,6
ФПМ-Д5	0	5	50	—	—	0,01—1000	55	194×134×80	2,6
ФПМ-Д6	0	10	50	—	—	0,01—1000	60	235×151×87	3,8

О к о н ч а н и е т а б л . 13.9

Тип фильтра	Частота рабочего тока, Гц	Рабочий ток, А	Номинальное напряжение, В			Полоса частот, МГц	Вносимое затухание, дБ	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
			постоянного тока	частотой 50 Гц	частотой 400 Гц				
ФПМ-Д7	0	20	50	—	—	0,01—1000	25	175×82×56	1,2
В15-1	0	4	150	—	—	0,1—1000	30	Ø14,8×52	0,035
В15-2	0	4	28	—	—	0,5—1000	45	Ø14,8×42	0,025
В15-3-1	0—50	0,2	50	36	—	0,01—1000	60	Ø14×43	0,03
В15-3-2	0—50	20	50	36	—	10—10 000	65	Ø22×23	0,06
В15-3-3	0—50	1	50	36	—	0,1—1000	65	Ø28×87	0,145
В15-3-4	0—50	1	50	36	—	0,1—1000	60	Ø28×107	0,19
В15-3-5	0—50	5	50	36	—	0,1—10 000	65	Ø42×112	0,39
В15-3-6	0—50	10	50	36	—	0,1—10 000	65	Ø50×142	0,62
В15-3-7	0—50	10	500	220	—	0,1—10 000	60	Ø22×67	0,095
В15-3-8	0—50	5	500	220	—	0,1—10 000	60	Ø42×112	0,46
В15-3-9	0—50	63	500	220	—	0,1—10 000	60	Ø42×77	0,37
В15-3-10	0—50	63	500	220	—	0,1—10 000	65	Ø42×112	0,54
В15-3-11	0—50	1	500	36	—	1—1000	60	Ø22×77	0,11
В15-3-12	0—50	5	50	220	—	0,5—1000	60	Ø42×92	0,44
В15-3-13	0—50	5	500	220	—	0,5—1000	65	Ø42×92	0,43
В15-3-14	0—50	1	500	220	—	0,5—1000	60	Ø28×107	0,22
В15-3-15	0—50	5	500	220	—	0,5—1000	60	Ø42×122	0,52
В7	0—50	5	—	250	—	100—1500	30—60	Ø6×12	0,0025
В14	0—50	5	—	500	—	100—1500	30—60	Ø11×12	0,004
В23А	0—50	5	—	300	—	100—10 000	30—60	Ø6×12	0,0025
ФПС-1	0—1000	10	—	—	250	0,05—10 000	40	14×94	0,2
ФПС-2	0—1000	4	—	—	250	0,05—10 000	50	68×60	1,1
ФПС-3	0—1000	40	—	—	250	1—10 000	40—50	68×33	1
ФПС-4	0—1000	100	—	—	500	1—10 000	50—60	50×185	0,8
ФПС-5	0—1000	40	—	—	500	1—10 000	30—40	94×250	6
Д19-1	0—400	0,5	—	220	220	0,15—300	20—60	40×25×25	0,2
Д19-2	0—400	1	40	—	220	0,15—300	20—60	70×26×50	0,5
Д19-3	0—400	1	—	220	—	0,15—300	20—60	70×26×50	0,5
Д19-4	0—400	2	—	220	—	0,15—300	20—60	70×26×50	0,5
Д19-5	0—400	2	40	—	—	0,15—300	20—60	65×16×49	0,45
Д19-6	0—400	3	—	—	—	0,15—300	20—60	90×50×60	1,4
Д19-7	0—400	5	12—110	220	220	0,15—300	20—60	80×35×60	0,7
Д19-8	0—400	5	40	—	—	0,15—300	20—60		

* Фильтры серийно не выпускаются. Имеется рабочая документация.

для симметричного П-образного фильтра нижних частот по формуле:

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n + Z_L/Z_n + 2 Z_i/Z_C + Z_L/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C) + Z_i Z_L/Z_C^2} \right|;$$

для Т-образного звена — по формуле

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n + 2 Z_L/Z_n + Z_i/Z_C + Z_L/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C) + Z_L^2/Z_n Z_C} \right|;$$

для Г-образного звена — по формуле

$$A_{\text{вн}} = 20 \lg \left| \frac{1}{1 + Z_i/Z_n + Z_L/Z_n + Z_i/Z_C + Z_L/Z_C + Z_i Z_L/(Z_n Z_C)} \right|,$$

где Z_i , Z_n , Z_L , Z_C — соответственно полные сопротивления источника помех, эквивалента сети, дросселя и конденсатора фильтра.

Соотношение между значениями сопротивлений Z_L и Z_C выбирается исходя из рабочего напряжения и входного сопротивления сети, в которую будет включен фильтр. При низких сетевых напряжениях и больших рабочих токах целесообразно увеличить емкости конденсаторов и уменьшить индуктивности дросселей. Ограничением здесь служат показатели надежности фильтра и ухудшение энергетических характеристик подключаемого электрооборудования. Кроме того, собственная резонансная частота конденсатора может оказаться ниже нижней частоты защищаемого радиодиапазона и ухудшить параметры фильтра в полосе задерживания. При малых значениях рабочего тока и высоком рабочем напряжении, особенно в сетях постоянного тока, более рационально применение виткового дросселя относительно большой индуктивности и конденсаторов с малой емкостью. Ограничением здесь является появление перенапряжений при коммутации источников с такими фильтрами. Кроме того, номинальное значение индуктивности виткового дросселя должно быть выбрано так, чтобы частота собственного резонанса дросселя находилась внутри полосы не пропускаемого фильтра. Одновременно расчет индуктивности дросселя должен производиться исходя из допустимых потерь напряжения сети на нем $\Delta U_{\text{доп}}$: $L \leq \Delta U_{\text{доп}}/(2\pi f_n I_p)$, где f_n — промышленная частота сети; I_p — номинальный рабочий ток на частоте f_n .

Если необходимо гальваническое разделение цепей, то в схему фильтра включается трансформатор, обмотки которого разделяются электростатическим экраном.

ИСКРОГАСИТЕЛИ

Искрогасители являются наиболее эффективным средством снижения ИРП от электромеханических коммутационных элементов. Искровой пробой межконтактного промежутка происходит

при напряжении на контактах $U_{\text{пр}} = 280 \div 300$ В, при этом напряжение горения дуги $U_d = 12 \div 15$ В. Дуговой разряд возникает лишь в тех случаях, когда номинальный ток коммутируемой цепи I_0 превышает минимальный ток поддержания дугового разряда $I_{\text{дмин}}$. Перенапряжения устраняются созданием низкочастотных колебательных или апериодических линейных или нелинейных цепей, шунтирующих либо межконтактный промежуток, либо коммутируемую индуктивность, либо то и другое вместе. Способ шунтирования контактов является наиболее универсальным.

На рис. 13.16 приведены типовые схемы искрогасителей. Здесь R — активное сопротивление коммутируемой цепи; R_0 , L — активное сопротивление и индуктивность катушки реле; R_n и C_n — активное сопротивление и емкость искрогасителя. В полосе частот до 0,1 МГц вносимое затухание для всех схем составляет 6—10 дБ; на частотах 0,1—30 МГц оно линейно возрастает до 20—40 дБ. Схема искрогасителя выбирается исходя из конкретных условий: значения рабочего тока I_0 , коммутируемого напряжения U_0 , характера нагрузки.

Так, схема рис. 13.16, а применяется для устранения искрового разряда в цепях, где номинальный ток цепи I_0 меньше минимального тока поддержания горения дуги $I_{\text{дмин}}$. При малых значениях индуктивности цепи (не более десятков миллигенри) можно применять схему рис. 13.16, б с меньшим значением емкости C_n . Усложненная схема рис. 13.16, в позволяет получить более сглаженный переходный процесс и соответственно меньший остаточный уровень помех; для малых значений L тот же эффект достигается применением схемы рис. 13.16, г при меньших значениях емкостей. Для цепей, где L составляет единицы генри, применяется схема рис. 13.16, д. Нелинейные схемы рис. 13.16, е-и обеспечивают снятие перенапряжений при переходных процессах в цепях с

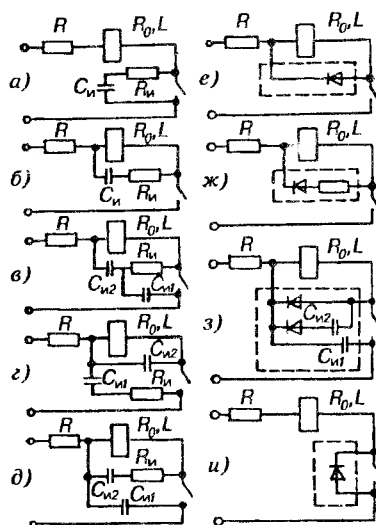


Рис. 13.16. Схемы искрогасителей

Т а б л и ц а 13. 10

Схема искрогасителя по рис. 13.16	$I_0 < I_{дmin}$		$I_0 > I_{дmin}$	
	$R_{и}$	$C_{и}$	$R_{и}$	$C_{и}$
a	$\leq U_{пр} / I_0$	$\geq L / R_{и}^2$	—	—
б	$\leq U_{пр} / I_0 - R$	$d \geq L / (R_{и}^2 + R_{и} R_0)$	—	—
в	$\leq U_{пр} / I_0$	$C_{и1} \geq L / R_{и}^2$	—	—
г	$\geq U_0 / I_{дmin}$	$C_{и1} \geq 4L / R_0^2$	$\leq U_{д} R / (I_0 R - U_{д})$	$C_{и1} \geq 4L / R_0^2$
д	$\leq U_{пр} / I_0$	$C_{и1} \geq 4L / (R_0 + R_{и})^2$	$\leq U_{д} / I_0$	$C_{и1} \geq 4L / (R_0 + R_{и})^2$

П р и м е ч а н и е. Для схем рис. 13. 16, в — д $C_{и1} = C_{и2}$.

большими L . Простейшая схема рис. 13.16, в применяется, если нет жестких требований к времени задержки срабатывания контактов. Схема рис. 13.16, г дает меньшее время задержки, но может применяться только при $I_0 < I_{допmin}$. Для цепей с большими коммутируемыми токами можно использовать схему рис. 13.16, з. Схема рис. 13.16, и применяется для устранения искрового разряда.

Наиболее распространенные схемы искрогасителей для цепей переменного тока 50 Гц с напряжением 220 В приведены на рис. 3.16, а, в, и. Выражения для расчета граничных значений параметров элементов приведены в табл. 13.10.

Нелинейные элементы (диоды и стабилитроны) для искрогасителей по схемам рис. 13.16, в-и выбираются исходя из следующих требований к обратному напряжению $U_{обр}$ и максимально допустимой амплитуде тока в прямом направлении $I_{доп}$: $U_{обр} > U_0$; $I_{доп} > I_0$.

ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ПРОВОДА

Отечественная промышленность выпускает помехоподавляющие провода марки ППЭ (ТУ16-705.197-81). Основные технические данные проводов приведены в табл. 13.11.

Провода марки ППЭ предназначены для подавления помех на частотах выше 1 МГц при напряжении до 250 В с частотой 50 Гц.

ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ ЭКРАНЫ

Помехоподавляющие экраны применяются для устранения электромагнитных связей между цепями источников помех и ослабления влияния поля помех. Они характеризуются отношением напряженности поля в защищенном пространстве в отсутствие и при наличии экрана, эффективность экранирования зависит от материала экрана, его толщины и степени непрерывности. В общем случае эффективность экранирования $\mathcal{E}$, дБ, оценивается поглощением электромагнитной энергии экраном $\mathcal{E}_п$, отражающей способностью экрана на границе раздела «пространство — экран» $\mathcal{E}_{01}$ и изменением поля за счет вторичного отражения $\mathcal{E}_{02}$: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_п + \mathcal{E}_{01} + \mathcal{E}_{02}$. Здесь $\mathcal{E}_п = 0,13t \sqrt{f \mu_r \sigma_{отн}}$; t — толщина экрана, мм; f — частота, Гц; μ_r — относительная магнитная проницаемость; $\sigma_{отн}$ — удельная электрическая проводимость материала, отнесенная к проводимости меди.

Влияние экрана на электромагнитное поле в виде плоской волны

$$\mathcal{E}_{01} = 168 - 10 \lg (\mu_r f / \sigma_{отн}).$$

Для электрического поля

$$\mathcal{E}_{01}^E = 322 + 10 \lg \sigma_{отн} / (f^3 \mu_r l^2),$$

где l — расстояние от источника излучения до экрана, м.

Для магнитного поля $l < 2\pi/\lambda$ (где λ — длина волны, м)

Т а б л и ц а 13.11

Марка	Сечение токо- проводящей жилы, мм ²	Сопротивление постоянному току на 1 км длины, Ом	Наружный диаметр провода, мм	Коэффициент затухания на 1 м длины, дБ, на частоте, МГц		
				1	10	100
ППЭ-1	1	30	6,7	0,2	1,5	10
ППЭ-1,5	1,5	22	7	0,2	1,5	10
ППЭ-2,5	2,5	13	7,5	0,2	1,5	10
ПВПА*	0,05	$2 \cdot 10^6$	7,5	—	—	250

* Высоковольтный для систем зажигания двигателей ТУ16-505-482-73.

$$\mathcal{E}_{01}^H = 14,6 + 10 \lg f l^2 \sigma_{\text{отн}} / \mu_r$$

Если в результате расчета $\mathcal{E}_{01} < 0$, то следует принимать $\mathcal{E}_{01} = 0$. Как правило, составляющая $\mathcal{E}_{02} < 0$ соответствует экранированию магнитных полей на низких частотах $\mathcal{E}_{02} = 20 \lg(1 - e^{-2l/\delta})$, где δ — эквивалентная глубина проникновения электромагнитной энергии в толщу экрана, мм.

Кроме однородного сплошного металла для электромагнитного экранирования могут использоваться многослойные экраны. На рис. 13.17 приведены характеристики многослойных экранов для низких частот.

Наряду с ними используются:

а) металлические сетки. Эффективность плоского экрана из металлической сетки, для плоской волны, дБ

$$\mathcal{E} = 20 \lg \left| \frac{1,5 \cdot 10^8}{af \left| \ln \frac{2a}{d} - 1,2 + \frac{10^5 \rho}{\pi^2 f d^2} [\beta(u) + j\alpha(u)] \right|} \right|$$

Здесь $\alpha(u) = R/R_0$; $\beta(u) = x/R_0$; R — активное сопротивление 1 м проволоки сетки на частоте f , Ом; R_0 — активное сопротивление 1 м проволоки постоянному току, Ом; x — индуктивное сопротивление 1 м проволоки, Ом; a — линейный размер ячейки сетки, мм; d — диаметр проволоки сетки, мм; f — частота, Гц; ρ — удельное сопротивление проволоки сетки, Ом·мм²/м; $u = d/\sqrt{2}\delta$; δ — глубина проникновения, мм; $\alpha(u) = \beta(u) = u/2\sqrt{2}$ для $u > 50$; $\alpha(u) = (\sqrt{2}u + 1)/4$, $\beta(u) = u/2\sqrt{2}$ для $50 > u > 6$.

Для магнитного поля эффективность сферического сетчатого экрана $\mathcal{E}^H = 20 \lg |1,4 \cdot 10^{-8} r_9| + \mathcal{E}$, где r_9 — радиус эквивалентного экранирования для плоской волны.

Для электрического поля эффективность сферического сетчатого экрана

$$\mathcal{E}^E = 20 \lg \left| \frac{6,3 \cdot 10^7}{r_9 f} \right| + \mathcal{E}.$$

Эффективность двухслойного экрана из сетки $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 + 20 \lg 4,2 \cdot 10^{-3} f t_{12}$, где $\mathcal{E}_1$ — эффективность экранирования однослойного сетчатого экрана, дБ; t_{12} — расстояние между сетками, м.

При проектировании сетчатых экранов необходимо иметь в виду следующее: при одинаковых d и a медные сетки имеют лучшие экранирующие свойства на низких частотах по сравнению со стальными во столько раз, во сколько удельная проводимость меди больше, чем стали; при $a = \text{const}$ одного и того же материала экранирующая эффективность сетки из толстой проволоки выше, чем сетки, выполненной из тонкой проволоки. Так как влияние контакта в узлах сетки не имеет значения, сетчатый экран можно обрабатывать антикоррозионными покрытиями, по этой же причине сетки для обеспечения герметичности можно формовать в неопрене, резине и других упругих материалах. В большинстве случаев сетки изготавливаются из меди, латуни, стали, алюминия.

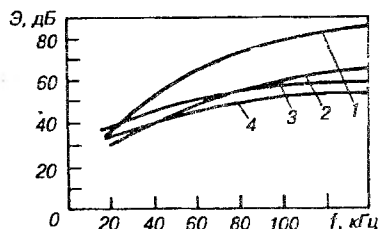


Рис. 13.17. Эффективность экранирования многослойных экранов (толщина каждого слоя 1 мм):

1 — медь — сталь ($\mu_r = 200$) — медь; 2 — медь — свинец — медь; 3 — алюминий — сталь — алюминий; 4 — медь — алюминий — медь

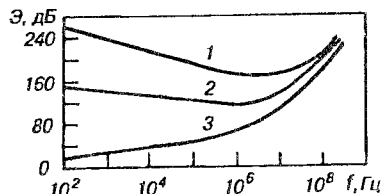


Рис. 13.18. Эффективность экранирования медной фольгой толщиной 125 мкм:

1 — для электрического поля; 2 — для плоской волны; 3 — для магнитного поля

Если сетки являются частью экрана, то они должны быть надежно соединены с основным экраном с помощью сварки, пайки или прижимными рамками;

б) металлическая фольга толщиной 0,01—0,05 мм. Она изготавливается в основном из диамагнитных материалов: алюминия, латуни, цинка. Эффективность этих материалов при экранировании электромагнитного и электрического полей достаточно высока (25—50 дБ). магнитную составляющую такие материалы ослабляют сравнительно мало. Стальную фольгу отечественная промышленность не выпускает.

Эффективность экранирования «электрически тонкого экрана» $\mathcal{E} \approx 20 \lg (60\pi/R_n)$, где $R_n = 1/\sigma_{\text{отн}} l$ — поверхностное сопротивление произвольного квадрата экрана, Ом.

На рис. 13.18 представлены частотные характеристики эффективности экранирования медной фольги;

в) металлизированные слои на поверхности неметаллических корпусов;

г) токопроводящие краски, обеспечивающие эффективность экранирования электромагнитного и электрического полей не менее 30 дБ в широкой полосе частот. В качестве токопроводящего пигмента используется обычно графит или ацетиленовая сажа, в качестве диэлектрического пленкообразующего материала — лаки (ТУ МХП Э219-52). Такая краска обладает поверхностным сопротивлением 5—6 Ом при толщине покрытия $2 \cdot 10^{-3}$ м, имеет хорошую адгезию к металлу, дереву, текстолиту, фанере, оштукатуренным поверхностям. Эффек-

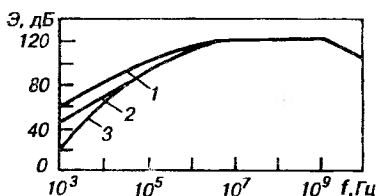


Рис. 13.19. Эффективность экранирования крупногабаритных камер из низкоуглеродистой стали толщиной: 1 — 6 мм; 2 — 3 мм; 3 — 1 мм

тивность экранирования токопроводящими красками рассчитывается по формуле для электрически тонких экранов;

д) стекла с токопроводящим покрытием (например, из оксида олова) обеспечивающие эффективность экранирования на радиочастотах не менее 30 дБ;

е) специальные ткани с металлической нитью, применяемые в основном для биологической защиты персонала в диапазоне СВЧ.

Основной причиной существенного снижения эффективности экранирования реального экрана по сравнению с расчетным является наличие отверстий и щелей.

При проектировании экрана с функционально необходимыми отверстиями следует учитывать следующее:

а) при экранировании сферическим экраном в электрическом поле наиболее неблагоприятной является экваториальная круговая щель, при экранировании в магнитном поле — меридиональная щель;

б) замена одного большого отверстия несколькими малыми, общая площадь которых равна площади большого отверстия, приводит к повышению эффективности экрана в $\sqrt{n}$ раз, где n — количество одинаковых отверстий; длинные щели по этой причине целесообразно разбивать перемычками на ряд коротких участков, в том числе щели перфораций;

в) проникновение поля через отверстие при применении патрубка снижается на $20 \lg |e^{\beta l}|$, где l — длина патрубка, мм.

Значения коэффициента β приведены в табл. 13.12.

Для экранирования соединительных кабелей применяются сплошные металлические оболочки, металлические оплетки или ленточные экраны.

Наибольшей эффективностью экранирования (свыше 40 дБ) обладают сплошные металлические оболочки.

Металлические оплетки эффективно подавляют электрические составляющие полей и ослабляют наводки, обусловленные емкостными связями.

Кабельные экраны ленточного типа выполняются из меди, алюминия и стальных лент, а также комбинированными: медь—сталь—медь или алюминий—сталь.

На промышленных предприятиях, в научно-исследовательских организациях, медицинских уч-

Т а б л и ц а 13.12

Форма патрубка	β , см	
	Электрическое поле	Магнитное поле
Круглый радиусом r , см	$\frac{2,4}{r}$	$\frac{1,84}{r}$
Прямоугольный с размерами сторон a и b , см	$\pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$	$\frac{\pi}{b}$

реждениях широко применяются экранированные кабины и помещения (рис. 13.19). Экраны для помещений и кабин изготавливаются обычно из листовой стали толщиной 0,5–1 мм или из медной либо стальной сетки.

Вентиляционные отверстия и рабочие проемы выполняются в виде металлических труб, затянутых металлической сеткой, или в виде системы волноводных фильтров (волноводной решетки).

Подводка любых электрических цепей внутрь экранированного помещения осуществляется только через помехоподавляющие фильтры. Прохождение посторонних линий электросети через экранированное помещение недопустимо.

Трубопроводы водяного охлаждения и отопления в местах входа и выхода из экранированного помещения должны иметь надежный электрический контакт с экраном помещения по всему периметру (с помощью приваренных фланцев). Волноводный фильтр также должен иметь хороший электрический контакт с экраном помещения по всему периметру проема.

В зависимости от необходимой эффективности экранирования экранировать помещения необходимо с учетом следующего.

1. Эффективность экранирования 100–120 дБ на частотах выше 100 кГц. Материал экрана — листовая сталь любой марки толщиной 0,5–1 мм, соединение листов — сваркой по всем швам внахлест. Окна закрыты двумя слоями густой медной или стальной сетки с расстоянием между слоями 50 мм. Контакт сетки оконного проема со стенками — пайка по всему периметру. Дверь должна быть выполнена из листовой стали, электрический контакт с экраном стены осуществляется посредством пружинящей гребенки из фосфористой бронзы. Вентиляция — круглые отверстия с приваренными патрубками длиной в 3–4 раза больше диаметра отверстия.

2. Эффективность экранирования 50–60 дБ. Материал — листовая сталь толщиной 0,5–1 мм или густая медная сетка с ячейкой 1×1 или 2×2 мм и диаметром проволоки соответственно 0,1 или 0,2 мм. Конструкция швов — нахлест 20 мм и точечная сварка через 100 мм (расстояние между точками соседних контактов должно быть не более $0,15 \lambda_{\min}$). Обеспечение надежного контакта при любой конструкции достигается сваркой с шагом 100 мм. Окна должны быть затянуты более редкой медной сеткой с обеспечением контакта с экраном стены через 200 — 400 мм. Дверь должна

иметь электрический контакт со стенами через 200 — 400 мм. Вентиляционные отверстия затягиваются редкой медной сеткой.

13.7. ПОДАВЛЕНИЕ ИРП В ОТДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ

Для устройств, создающих электромагнитные колебания при выполнении своих функций (например, электронные ключи), воздействие на механизм образования ИРП заключается в правильном выборе параметров используемых колебаний с целью максимально возможного ограничения занимаемой полосы частот.

Для устройств, в которых электромагнитные колебания являются недопустимыми, применяют элементы, не создающие помех искрогашению, или

используют плавное регулирование, исключаящее броски тока и напряжения. В тех случаях, когда не удастся избежать образования ИРП, применяют фильтрацию и экранирование. Кроме того, эффективным средством снижения электромагнитных излучений от соединительных цепей является их симметрирование — уменьшение тока в контуре «система проводов — земля» и скручивание симметричных цепей. Скрутка приводит к взаимной компенсации электромагнитных излучений от отдельных участков помехонесущей цепи и снижению общего уровня излучения на 20—40 дБ.

В табл. 13.13 приведены сведения по основным способам снижения ИРП в отдельных источниках.

Т а б л и ц а 13.13

Подавление ИРП в отдельных источниках

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Электрические машины	Коммутация коллекторных пластин скользящей щеткой; нарушение контакта из-за плохой притирки щеток, их вибрации, недостаточного давления на кольца; вибрация вала из-за неточной центровки вала и ротора	Симметрирование обмоток возбуждения статора; увеличение числа секций и коллекторных пластин; применение дополнительных компенсационных обмоток; использование слоистых щеток; тщательное соблюдение технологии сборки; обеспечение надежного электрического контакта между частями корпуса машины, между валом и корпусом; металлизация внутренней поверхности пластмассового корпуса; фильтрация питающей электрической цепи; фильтрация конденсаторными блоками емкостью 0,5—1 мкФ стационарных машин большой мощности; симметричная блокировка конденсаторами К73-21 емкостью 0,22—1 мкФ для устройств с малогабаритными коллекторными двигателями хорошего качества с невысокой частотой вращения и мощностью более 500 Вт; применение комбинированных емкостных фильтров для маломощных высокооборотных машин с плохо притертыми щетками: К75-37 — $0,22 \div 2 \times 0,0047$ мкФ; К75-37 — $0,47 \div 2 \times 0,0047$ мкФ; К75-37 — $0,68 \div 2 \times 0,0047$ мкФ или сочетания конденсаторов К73-21 с фильтрами Б23, Б7, Б14 Для дополнительного помехоподавления на высоких частотах на выводы надеваются ферритовые трубки (бусы) М600НН (УВ7.076.176 ТУ). Электродвигатели ручного инструмента фильтруются блоками К75-41, особо интенсивные источники помех с электродвигателями — двухзвенными индуктивно-емкостными фильтрами
Выключатели, рубильники, реле	Броски тока и напряжения при замыкании, электрическом пробое и дуге в межконтактном промежутке; вибрация и дрейбег контактов	Применение быстродействующих контактных терморегуляторов с оптимальными характеристиками упругости и сжатия контактов; реостатное (плавное) включение-выключение нагрузок; применение синхронных схем коммутации в моменты, соответствующие нулю тока (напряжения) в коммутируемой цепи; искрогашение; использование корпусов оборудования (шкафов) в качестве электрических экранов схем коммутации; групповая фильтрация

Продолжение табл. 13.13

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Электротранспорт (контактные сети, подвижной состав, тяговые подстанции, системы СЦБ)	Работа электрических машин, преобразователей и регуляторов напряжения, устройств управления, сигнализации и блокировки; отрыв токоприемника от контактного провода; корона на проводах; перекрытие изоляторов	Фильтрация электрических машин, искрогашение на контактах реле; включение дросселей (радиореакторов) в токоприемные устройства; применение графитно-угольных токоприемных пластин и вставок; применение рессорной подвески токосъема; установка блокировочных конденсаторов параллельно выгильям тяговых подстанций; устранение загрязнения контактных сетей и устройств токосъема, обеспечение надежного контакта в вибрирующих частях конструкций
Воздушные линии электропередачи и подстанции	Корона на проводах, высоковольтных частях распределительных и других устройств; пробой и перекрытие дефектных и загрязненных изоляторов; кистевой разряд с острых краев токонесущих частей	Увеличение эквивалентного диаметра проводов путем расщепления каждой фазы на 3—6 проводов; округление острых краев деталей линий и распределительных устройств подстанций; сохранение при монтаже неповрежденной поверхности линейных проводов; установка заградительных экранирующих колец вокруг крепежа гирлянд к проводам фазы; применение стойких изоляционных материалов и тарельчатых изоляторов с малыми диэлектрическими потерями без микротрещин и пузырьков; обеспечение надежных контактов в линейной арматуре и распорках; фильтрация оборудования подстанций путем установки конденсаторных блоков между токонесущими цепями и контуром заземления; удаление линий и подстанций от радиоприемных центров и других объектов
Электросварочное оборудование	Сварочная дуга; работа реле, контакторов, искровых высокочастотных генераторов, тиристорных прерывателей при точечной сварке, электрических машин в автономных сварочных установках	При сварке постоянным током — фильтрация электрических машин и цепи электродов; несимметричная блокировка вторичной питающей сети конденсаторами КБП, К75П-4 или КЗ (0,1—1 мкФ) в шкафу управления; при сварке переменным током с тиристорным регулированием производится установка одно-, двухзвенных фильтров в каждом проводе вторичной цепи, несимметричных конденсаторов 0,01 мкФ и симметричного конденсатора 1 мкФ в первичной цепи сварочного трансформатора; при необходимости сварочное помещение экранируется, на вводы питающих электрических цепей дополнительно устанавливаются экранированные двухзвенные индуктивно-емкостные фильтры
Промышленные, научные, медицинские ультра-звуковые и высокочастотные установки	Излучение от элементов электрической схемы, включая рабочие элементы, на основной частоте и высших гармониках	Ограничение полосы частот, разрешенных для использования; поблочное или полное экранирование с применением вентиляционных и технологических проемов в виде волноводных фильтров; применение двухтактных схем генераторов, обеспечивающих подавление четных гармоник; фильтрация питающих и управляющих электрических цепей. Для емкостной блокировки маломощных установок применяются конденсаторы 0,022—1 мкФ (в зависимости от рабочей частоты); для незаземленных установок с рабочими частотами выше 20 МГц используются проходные фильтры БЗ3, Б7, Б14 или проходные конденсаторы К10-44, КТП, К10П-1 емкостью не более 5000 пФ, для установок с более низкими рабочими частотами — более сложные схемы; для фильтрации низкочастотных мощных заземляемых установок применяются П-образные схемы с конденсаторами К75П-4 и КЗ (0,47—1 мкФ), для высокочастотных установок — схемы с проходными конденсаторами КБП-Ф, фильтры серий ФП и ФБ; для рабочих частот не выше 20 МГц и рабочих токов до 40 А используются витковые дроссели

Окончание табл. 13.13

Вид электрооборудования	Причины помех	Основные средства подавления помех
Другое оборудование предприятий и учреждений	Работа электрических машин, магнитных пускателей, реле, контакторов, тиристорных схем регулирования и пр.	Несимметричная емкостная блокировка источников помех конденсаторами КБП, КЗ или К75П-4 (0,47 — 1 мкФ); дополнительная симметричная блокировка конденсаторами МБГЧ или К75-10 (0,47—1 мкФ) интенсивных источников помех, силовых пусковых стативов, шитов питания кранового и сварочного оборудования; более сложная фильтрация тиристорных схем регулирования; установка искрогасителей на разрывные контакты; применение фазированных коммутаторов в цепях переменного тока; установка электростатических экранов между обмотками разделительных трансформаторов; применение экранированных кабелей и силовых кабелей со скрученными парами; применение одноточечной низкочастотной и многоточечной высокочастотной схем заземления всего оборудования на общий контур рабочего заземления; устройство отдельного контура заземления электроники; экранирование пультов управления, стативов, помещений с интенсивными источниками помех; прокладка групп кабелей в металлических трубах и коробах; раздельная прокладка силовых и сигнальных цепей
Устройства вычислительной техники	Работа импульсных схем питания, управления, коммутации	Применение индуктивно-емкостных схем фильтрации с конденсаторами К73-21, К75-10, К75-37, МБГЧ и высокочастотными дросселями серии ДМ или типовыми дросселями выпрямителей Д222-Д270, искрогасителей, скрученных проводов; экранирование блоков питания
Лифты различных систем	Работа электрических машин и контактных систем управления и блокировки	Применение вводных устройств серии ВУ, снабженных емкостными фильтрами
Автомобили и другие устройства с двигателями внутреннего сгорания	Скачки напряжения и тока в низковольтных и высоковольтных цепях системы зажигания основного или вспомогательных двигателей, устройства управления, сигнализации; работа электрогенератора	Заглубление свечей в тело блока цилиндров; рациональная компоновка системы зажигания с целью минимизации длины высоковольтных проводов; применение высоковольтных помехоподавляющих проводов; обеспечение надежного контакта в электрических цепях и предотвращение пробоев по поверхности пластмассовых и резиновых изоляторов; включение помехоподавляющих сопротивлений в цепи распределителя зажигания и каждой свечи [63.16]; емкостная блокировка низковольтной цепи системы зажигания и других цепей (на автомобилях с радиостанциями применяется полное экранирование системы зажигания)
Приборы и оборудование бытового и коммунального назначения, подключаемые к электрическим сетям жилых зданий	Работа электрических машин, блоков питания радиоэлектронной аппаратуры, автоматов и выключателей, светильников с люминесцентными лампами	Фильтрация электроустройств с электродвигателями и блоков питания; экранирование электроустройств; металлизация пластмассовых корпусов; применение прокладок из токопроводящей резины; применение быстродействующих терморегуляторов, синхронных выключателей, искрогасителей; улучшение технологии изготовления и конструкции люминесцентных ламп

13.8. КОМПЛЕКСНОЕ И ГРУППОВОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ИРП

Комплексное помехоподавление представляет собой сочетание индивидуального и группового помехоподавления, других средств борьбы с ИРП. Среди этих средств — фильтрация, экранирование, рациональная схема контура заземления, правильная прокладка взаимовлияющих цепей и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

13.1. Асинхронные двигатели общего назначения / Под ред. В.М.Петрова, А.Э.Кравчика. М.: Энергия, 1980.

13.2. Вибрация и шум электрических машин / Н.В.Астахов, В.С.Малышев, В.Т.Медведев и др. М.: МЭИ, 1984.

13.3. Вибрации и шум машин постоянного тока и асинхронных машин / Н.В.Астахов, В.С.Малышев, В.Т.Медведев и др. М.: МЭИ, 1984.

13.4. Проектирование электрических машин с пониженными уровнями вибрации. Машины постоянного тока / Н.В.Астахов, В.С.Малышев, В.Т.Медведев и др. М.: МЭИ, 1984.

13.5. Расчет магнитных вибраций асинхронных

двигателей / Н.В.Астахов, Б.С.Малышев, В.Т.Медведев и др. М.: МЭИ, 1985.

13.6. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под ред. Е.Я.Юдина, М.: Машиностроение, 1985.

13.7. Вибрация энергетических машин / Под ред. Н.В.Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974.

13.8. Детинко Ф. М., Загородная Г.А., Фастовский В.М. Прочность и колебания электрических машин. Л.: Энергия, 1969.

13.9. Исакович М.М., Клейман Л.И., Перчаков Б.Х. Устранение вибрации электрических машин. Л.: Энергия, 1979.

13.10. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 т. / Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1978.

13.11. Справочник по судовой акустике / Под ред. И.И.Клюкина и И.И.Боголепова. Л.: Судостроение, 1978.

13.12. Шубов И.Г. Шум и вибрации электрических машин. Л.: Энергия, 1974.

13.13. Медведев В.Т., Титюхин Н.Ф. Электрические машины и трансформаторы вибрации электрических машин. Т.8. М.: Итоги науки и техники, 1990.

13.14. Астахов Н.В., Юргенсон Т.С. Магнитные вибрации асинхронных машин. М.: МЭИ, 1987.

Раздел 14

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

14.1. Диэлектрики, диэлектрические и электроизоляционные материалы, классификация, электрические свойства	304	14.3. Газообразные диэлектрики	308
14.2. Механические, термические и физико-химические свойства диэлектрических материалов	306	14.4. Жидкие электроизоляционные материалы	308
		14.5. Твердые электроизоляционные материалы	310
		14.6. Керамические материалы	319
		Список литературы	325

14.1. ДИЭЛЕКТРИКИ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КЛАССИФИКАЦИЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле и в которых возможно существование электростатического поля, так как электрические заряды его атомов, молекул или ионов связаны. Используемые же на практике диэлектрики содержат и свободные заряды, которые, перемещаясь в электрическом поле, обуславливают электропроводность на постоянном напряжении. Однако количество таких свободных зарядов в диэлектрике невелико, а поэтому

ток весьма мал, т. е. для диэлектрика характерным является большое сопротивление прохождению постоянного тока.

Согласно ГОСТ 21515-76 диэлектрическими материалами считают класс электротехнических материалов, предназначенных для использования их диэлектрических свойств, а именно большого сопротивления прохождению электрического тока и способности поляризоваться. Электроизоляционными материалами называют «диэлектрические материалы, предназначенные для электрической изоляции», являющейся неотъемлемой частью электрической цепи и необходимой для того, чтобы не пропускать ток по не предусмотренным электрической схемой путям.

По агрегатному состоянию диэлектрические ма-

материалы разделяются на газообразные, жидкие и твердые. По происхождению различают диэлектрические материалы *природные*, которые могут быть использованы без химической переработки, *искусственные*, изготавливаемые химической переработкой природного сырья, и *синтетические*, получаемые в ходе химического синтеза. По химическому составу их разделяют на *органические*, представляющие собой соединения углерода с водородом, азотом, кислородом и другими элементами; *элементоорганические*, в молекулы которых входят атомы кремния, магния, алюминия, железа и других элементов; *неорганические*, не содержащие в своем составе углерода.

Из многообразия свойств диэлектрических материалов, определяющих их техническое применение, главными являются электрические свойства: электропроводность, поляризация и диэлектрические потери, электрический пробой и электрическое старение.

Электропроводность диэлектрических материалов обусловлена существованием в них весьма небольшого количества свободных зарядов: электронов (дырок), ионов, молионов. Молионы присущи жидким диэлектрикам и представляют собой частицы твердых диэлектриков коллоидных размеров (10^{-6} м), которые заряжаются, адсорбируя имеющиеся в жидкости ионы. Носители заряда образуются в результате термической генерации, фотогенерации, действия ионизирующих излучений, инжекции электронов (дырок) с металлических электродов, ударной ионизации в сильных электрических полях. Различают дрейфовый, прыжковый (носитель большую часть времени локализован, перемещения занимают меньшую часть) и диффузионный механизмы перемещения носителей заряда. Направленный поток носителей заряда в диэлектриках (электрический ток) может обуславливаться: электрическим полем; градиентом температур; сочетаниями электрического поля и градиента температур, электрического и магнитного полей, градиента температур и магнитного поля.

Электропроводность диэлектрика характеризуется удельными объемной σ , См $\cdot$ м $^{-1}$, и поверхностной σ_s , См, проводимостями или удельными объемным ρ , Ом $\cdot$ м, и поверхностным ρ_s , Ом, сопротивлениями (для газообразных и жидких диэлектриков σ_s и ρ_s не определяются). При нормальных температуре, влажности и напряженности электрического поля ρ составляет 10^6 — 10^8 для низкокачественных и 10^{14} — 10^{17} Ом $\cdot$ м для высококачественных диэлектриков. С ростом температуры ρ жидких и твердых диэлектриков, как правило, уменьшается. Уменьшение ρ характеризуют температурным коэффициентом удельного объемного сопротивления, К $^{-1}$, ТК $\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$.

Измерения ρ и ρ_s производят при постоянном напряжении согласно ГОСТ 6433.1-71.

В электрическом поле в диэлектрике происходит *поляризации*: за время 10^{-16} — 10^{-15} с *электронная упругая* у всех диэлектриков независимо от агрегатного состояния; в течение 10^{-14} — 10^{-13} с

ионная упругая (в ионных кристаллах); за соизмеримое с полупериодом $T/2$ приложенного напряжения время *дипольная* (в полярных диэлектриках) и *миграционная* — *объемно-зарядовая* и *тепловая ионная* (в содержащих микро- и макронеоднородности диэлектриках); *доменная* (в сегнетоэлектриках), определяемая ориентацией векторов спонтанной поляризованности.

Поляризация диэлектрика может быть вызвана: механическими нагрузками (пьезополяризация в пьезоэлектриках); нагревом (пирополяризация в пирозлектриках); светом (фотополяризация).

Поляризованное состояние диэлектрика в электрическом поле E характеризуется электрическим моментом единицы объема, поляризованностью P , Кл/м 2 , которая связана с его относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r : $P = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Произведение $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$, Ф/м, называют абсолютной диэлектрической проницаемостью. В газообразных диэлектриках ϵ_r мало отличается от 1,0, в неполярных жидких и твердых достигает 1,5—3,0, в полярных имеет большие значения; в ионных кристаллах $\epsilon_r = 5 \div 10$, а в имеющих перовскитовую кристаллическую решетку достигает 200; в сегнетоэлектриках $\epsilon_r = 10^3$ и больше.

В неполярных диэлектриках с ростом температуры ϵ_r незначительно уменьшается, в полярных изменения ϵ_r связаны с преобладанием того или иного вида поляризации, в ионных кристаллах ϵ_r увеличивается, в некоторых сегнетоэлектриках при температуре Кюри $\epsilon_r = 10^4$ и больше. Температурные изменения ϵ_r характеризуют температурным коэффициентом, К $^{-1}$, ТК $\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dT}$. Для поляр-

ных диэлектриков характерным является уменьшение ϵ_r в области частот, где время τ на поляризацию соизмеримо с $T/2$.

Диэлектрическими потерями называют мощность, поглощаемую диэлектриком из электрического поля вследствие электропроводности, медленных видов поляризации (их время τ соизмеримо с $T/2$), ионизации газовых включений на высоких частотах и в сильных электрических полях в диэлектриках.

Диэлектрические потери характеризуются углом диэлектрических потерь δ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = P_a/P_p$, где P_a — *мощность диэлектрических потерь*, P_p — *реактивная мощность конденсатора*. Произведение $\epsilon_r \text{tg } \delta = \epsilon''$ называют *коэффициентом диэлектрических потерь*. Удельные диэлектрические потери, Вт/м 3 , $P_{уд} = \sigma E^2$, при постоянном напряжении; $P_{уд} = 5,56 \cdot 10^{-11} E^2 \epsilon_r f \text{tg } \delta$ при переменном с частотой f , Гц; произведение $\sigma_a = 5,56 \cdot 10^{-11} \epsilon_r f \text{tg } \delta$, См $\cdot$ м $^{-1}$, называется *проводимостью диэлектрика на переменном напряжении*. Критерием существования различных механизмов потерь служит соотношение $f \epsilon_r \rho \text{tg } \delta \geq 1,8 \cdot 10^{10}$, где знак равенства соответствует существованию потерь только от электропроводности. Определение ϵ_r и

$\text{tg}\delta$ при частоте 50 Гц производят согласно ГОСТ 6433.4-71 и ГОСТ 6581-75.

Для диэлектриков, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, $\text{tg}\delta$ не должен превышать 10^{-3} , для работающих в менее ответственных условиях допускается большее значение $\text{tg}\delta$.

В неполярных диэлектриках, ионных кристаллах с ростом температуры $\text{tg}\delta$ увеличивается (как и ϕ), в полярных при температурах, где τ и $T/2$ соизмеримы, $\text{tg}\delta$ имеет максимум, который смещается в область больших температур при увеличении частоты. С ростом частоты в неполярных диэлектриках $\text{tg}\delta$ уменьшается, в полярных в области, где τ и $T/2$ соизмеримы, имеет максимум, смещающийся в область больших частот при увеличении температур.

Пробой, электрическая прочность, электрическое старение диэлектриков. Пробой, потеря электрической прочности наступает, если в ходе повышения приложенного к изоляции напряжения протекающий через нее сквозной ток возрастает до 10^8 А/м². Различают следующие три вида пробоя диэлектриков.

Электрический пробой (электронный пробой), протекающий за 10^{-8} — 10^{-5} с, обусловлен ударной ионизацией ускоренными в электрическом поле электронами. Электрическая прочность при электрическом пробое воздушных промежутков при нормальных условиях составляет $3 \cdot 10^6$ В/м, тщательно очищенных жидкостей достигает 10^8 В/м, твердых диэлектриков (монокристаллов) $\sim 10^9$ В/м.

Электротепловой пробой (тепловой пробой) обусловлен прогрессивно нарастающим выделением теплоты в диэлектрике под действием диэлектрических потерь в местах наихудшего теплоотвода образца (изделия). Такой пробой развивается за 10^{-3} — 10^2 с, $E_{\text{пр}}$ здесь достигает 10^7 В/м.

Электрохимический пробой (электрическое старение) обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под воздействием электрического поля и (или) разрядов в окружающей среде. Время развития электрохимического пробоя составляет 10^3 — 10^8 с и называется временем жизни диэлектрика $\tau_{\text{ж}}$. С увеличением температуры и напряженности электрического поля $\tau_{\text{ж}}$, как правило, уменьшается. Такой пробой развивается в полях, значительно меньших, чем $E_{\text{пр}}$ диэлектрика. Основной причиной электрического старения полимеров являются частичные разряды (ЧР).

Развитие той или иной формы пробоя зависит от природы диэлектрика и условий определения $E_{\text{пр}}$ или эксплуатации. При испытаниях на импульсах длительностью 10^{-8} — 10^{-5} с в условиях отсутствия разрядов у краев электродов происходит электрический пробой. Если σ такого диэлектрика велика и резко зависит от температуры, то при выдержке этого же образца под напряжением в течение 10^{-3} — 10^{-2} с в нем развивается тепловой пробой. При воздействии на образец в течение длительного времени меньшими напряжениями, при которых в диэлектрике происходят ЧР или другие процессы, обуславливающие старение, наблюдается электрохимический пробой.

Значения напряжений пробоя и $E_{\text{пр}}$ определяют согласно ГОСТ 6433.3-71.

14.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТЕРМИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Механические свойства характеризуют способность диэлектрика выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимого изменения первоначальных размеров и формы.

Т а б л и ц а 14.1

Стандарты, применяемые при определении параметров, характеризующих механические свойства электроизоляционных материалов

Название параметра	Название материалов	Номер стандарта
<i>Разрушающее напряжение при статическом растяжении</i>	Пластмассы; слоистые пластики Керамические материалы Изделия в виде трубок Тонкие листы бумаги, картона, стеклоткани	ГОСТ 11262-80 ГОСТ 24409-80 ГОСТ 19034-82 ГОСТ 13525.1-79
<i>Разрушающее напряжение при статическом сжатии</i>	Пластмассы и слоистые пластики Полимерные пленки	ГОСТ 4651-82 и ГОСТ 9550-81 ГОСТ 14236-81
<i>Разрушающее напряжение при статическом изгибе</i>	Пластмассы; изделия в виде трубок	ГОСТ 4648-71
<i>Твердость</i>	Пластмассы Пленки электроизоляционных лаков и эмалей Резины	ГОСТ 4670-91, ГОСТ 24622-91, ГОСТ 24621-91 ГОСТ 13526-79 ГОСТ 263-75
<i>Ударная вязкость</i>	Пластмассы; композиционные материалы; слоистые пластики	ГОСТ 4647-80
<i>Сопротивление раскалывания</i>	Пластмассы	ГОСТ 13537-68
<i>Стойкость к надрыву</i>	Гибкие материалы (лакобумаги; лакоткани)	ГОСТ 21555-76
<i>Гибкость по числу двойных перегибов</i>	Электроизоляционные бумаги; пленки	ГОСТ 13525.2-80
<i>Пластоэластические свойства (пластичность, мягкость и «восстанавливаемость»)</i>	Каучуки и резиновые смеси	ГОСТ 415-75

Параметры, характеризующие механические свойства, как правило, определяются по стандартизованным методикам (табл. 14.1).

Термические свойства характеризуют поведение диэлектрика при нагревании (охлаждении) и в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. *Коэффициент теплопроводности* λ , Вт/(м·К), или Вт/(м·°С) для газообразных диэлектриков имеет значение 2—5, для твердых — 0,02—3,00 Вт/(м·К) и определяет отвод теплоты из толщи электрической изоляции, нагретой за счет диэлектрических потерь, или нагрев в ходе технологической переработки. Его можно определять по ГОСТ 23630.2-79. Время нагрева (охлаждения) электроизоляционных конструкций в периоды изготовления или эксплуатации определяется по *теплоемкостью* диэлектрических материалов C , Дж/(кг·К). Значения теплоемкости определяют по ГОСТ 23630.3-79. Для электротехнического фарфора, стеатита, стекол $C = -300 \div 1000$, для органических полимеров 1200—2000, для нефтяного электроизоляционного масла 1800—2500, для воды 4200 Дж/(кг·К). Твердые кристаллические диэлектрики при нагревании плавятся при *температуре плавления* $T_{пл}$; аморфные становятся жидкими в интервале температур, который характеризуют *условной температурой размягчения* $T_{разм}$; ее определяют по ГОСТ 11506-73 для битума, компаундов, по ГОСТ 15088-83, ГОСТ 21341-75 для пластмасс. Температурный коэффициент длины, K^{-1} , $TKl = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$ для материалов высокой нагревостойкости определяют по ГОСТ 15173-70.

Способность электрической изоляции без повреждения и без недопустимого ухудшения практически важных для нее свойств (например, механической прочности, $E_{пр}$, ρ , $tg\delta$, потери массы при нагреве, количества поглощенной влаги и других параметров) выдерживать воздействие одного или нескольких старящих ее факторов в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации, определяет ее *стойкость к воздействию старящих факторов*. *Дугостойкость*, *трекинговая стойкость* характеризуют способность диэлектрика соответственно выдерживать в течение определенного времени без недопустимого ухудшения свойств поверхности воздействие на нее дуги переменного (ГОСТ 10345.1-78) или постоянного (ГОСТ 10345.2-78) тока, сохранять меньшее допустимого значение тока, протекающего по проводящим каналам — трекам загрязненной электролитом или синтетической пылью поверхности. *Нагревостойкость* электроизоляционных материалов определяется их способностью выдерживать действие повышенных по сравнению с рабочей температур (ГОСТ 21515-76). *Холодостойкость* определяется путем сравнения механических характеристик (например, деформаций при растяжении) при отрицательной и нормальной температурах. *Стойкость к термоударам* определяется для хрупких материалов и изделий из них способностью сохранять нужные свойства после воздействия тре-

буемого числа циклов термоударов (нагрева и резкого охлаждения). *Влагостойкость*, *водостойкость* и *водопоглощение* диэлектрика определяются (ГОСТ 10315-75) его способностью сорбировать влагу окружающей среды, соответственно влажного воздуха или в процессе выдержки в дистиллированной воде. *Химостойкость* характеризует стойкость материала к разрушению (коррозии) при контактировании с водой, кислотами, щелочами, солевыми растворами, топливом, газами и определяется по изменению внешнего вида, массы, электрических и других параметров. *Тропикостойкость* диэлектрика определяется по изменению ρ , $tg\delta$, $E_{пр}$, механической прочности, а также других параметров под воздействием тропических климатических факторов. *Радиационная стойкость* определяется по изменению механических свойств, во многом определяющих изменения $E_{пр}$, ρ , $tg\delta$, в процессе радиолитизации материала под воздействием ионизирующих излучений. Определение воздействия внутренних ЧР производится по характеристикам возникающего в изоляции единичного ЧР согласно ГОСТ 22756-77 для изоляции силовых конденсаторов, трансформаторов, кабелей, электрических машин.

14.3. ГАЗООБРАЗНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Газообразные диэлектрики широко используются при изготовлении высоковольтных аппаратов (воздушные и элегазовые выключатели, разрядники и др.), кроме того, воздух окружает большое число электротехнических установок, а в ЛЭП является основной изолирующей средой. В ряде электро- и радиотехнических, радиоэлектронных устройств и приборов используются различные газонаполненные элементы, где важны не только общезфизические свойства газов, но и их электрические характеристики.

Наиболее важное свойство газов с точки зрения использования в электроаппаратуре — это способность их восстанавливать электрическую прочность. Другими важными свойствами являются малые плотность и диэлектрическая проницаемость, высокое значение удельного сопротивления, очень малый $tg\delta$ практически отсутствие старения, инертность ряда газов по отношению к твердым и жидким материалам, нетоксичность, способность их работать при низких температурах и высоком давлении, негорючесть.

Основные свойства газов и их применение приведены в табл. 14.2.

14.4. ЖИДКИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Современная техника использует большое число жидкостей, которые обладают электроизоляционными свойствами. Конкретная область применения предъявляет к жидким диэлектрикам и иные требования: высокой теплопроводности, стойкости к окислению, совместимости с твердыми материалами, пожаробезопасности, экологической безопас-

Т а б л и ц а 14.2

Основные свойства и применение газов

Газ	Хими- ческий состав	Моле- куляр- ная масса	Плот- ность при 0°С и 0,1 МПа, кг/м ³	λ , Вт/(м× °К)	$T_{пл}$, °С	$T_{кип}$, °С	Удельная теплосе- мкость, кДж/(кг× °К)	ϵ_r	$E_{пр}$, МВ/м	Применение
Воздух	Смесь газов	28,952	1,2929	0,0257	-213,0	-194,0	1,01	1,00059	3	Выключатели
Водород	H ₂	2,0156	0,08988	0,175	-259,14	-252,8	14,5	1,00027	1,8	Турбогенераторы
Азот	N ₂	28,016	1,2506	0,0269	-209,86	-195,8	1,06	1,00058	3	Эталонные (измерительные) конденсаторы, кабели (в смеси с элегазом)
Элегаз	SF ₆	146,06	6,700	0,0146	—	-63,8	0,652	1,00191	7,8	Выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряже- ния, кабели, изме- рительные конде- нсаторы
Аргон	Ar	39,948	1,78	0,0163	-189	-185,5	0,52	1,00056	—	Газотроны, тиратроны, фото- элементы
Неон	Ne	20,183	0,90	0,0455	-248,5	-245,8	1,03	—	—	Разрядники, лампы
Гелий	He	4,0026	0,1785	0,1423	—	-268,78	5,27	1,000072	0,72	Системы глубокого охлаж- дения и устрой- ства дугогашения
Хладон-12 (фреон)	CCl ₂ F ₂	120,93	0,54306	0,01046	-158	-29,79	0,96296	1,0006	7,4	Электрические аппараты

Свойства электро

Жидкость		Плотность (20 °С), кг/м ³	Кинема- тическая вязкость (20 °С), 10 ⁻⁶ м ² /с	$E_{пр}$, МВ/м	$\operatorname{tg} \delta$	ρ_v , Ом·м	ϵ_r
Нефтяная	Трансформаторное масло (ТКп, ТСп, ТК, Т-1500)	883,2-895	17,6—30	15—20	$(0,5 \div 2) \cdot 10^{-3}$	$10^{12}—10^{13}$	2,1—2,4
	Конденсаторное масло	800—901	30—37	20	$5 \cdot 10^{-3}$ при 100 °С	10^{12}	2,1—2,3
	Кабельное масло (МН-2, С-220, С-110, КМ-25)	837—900 и более (КМ-25)	25—800	15—22	$(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$	$10^{10}—10^{13}$	2,1—2,3
Синтетическая	Совол, совтолы	1510—1560	115—650	14—22	$(5 \div 6) \cdot 10^{-3}$	$10^{11}—10^{13}$	4,5—5,2
	Полиэтилсилоксано- вые жидкости (132- 712 Д, ПЭС-3)	960	15—140	18—45	$(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$	$10^{11}—3 \cdot 10^{12}$	2,4—2,5
	Полиметилсилокса- новые жидкости (ПМС-10, ПМС-20, ПМС-50)	942—974	18—50	15—35	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{12}$	2,6—2,7
	Полихлор (фтор) — органосилоксановые жидкости 161—123, 161—45	1080—1145	18—550	—	$(1 \div 200) \cdot 10^{-4}$	$(4 \div 50) \cdot 10^{10}$	5,4—5,8

ности, вязкости, стабильности и т. п. Ни одна жидкость не может удовлетворить всем предъявляемым требованиям одновременно, поэтому необходимо при использовании той или иной жидкости ориентироваться на важнейшие для каждого конкретного случая свойства. Основные свойства электроизоляционных жидкостей приведены в табл. 14.3.

Большинство из электроизоляционных свойств жидкостей зависит от температуры, давления, влаж-

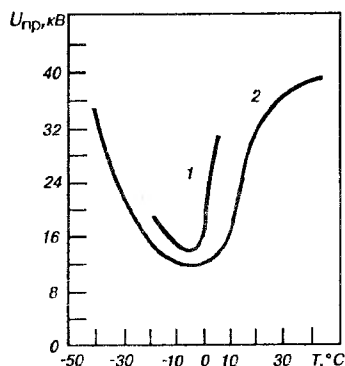


Рис. 14.1. Зависимость напряжения пробоя трансформаторного масла от температуры:

1 — масло ТКп; 2 — масло Т-1500; электроды — диски диаметром 25 мм с закругленными краями, расстояние между дисками 2,5 мм

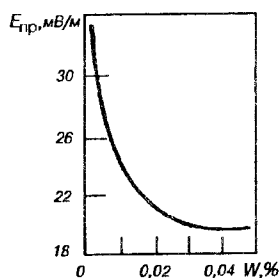


Рис. 14.2. Зависимость электрической прочности масла от содержания в нем влаги

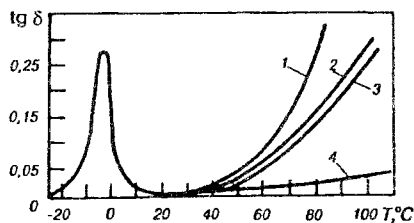


Рис. 14.3. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для совола различной степени очистки при частоте 50 Гц:

1 — после первой перегонки; 2 — после второй перегонки; 3 — после обработки силикагелевым адсорбентом; 4 — после обработки глинистым адсорбентом

изоляционных жидкостей

Таблица 14.3

Температура застывания, °С	Кислотное число, мг КОН/г	Цвет	Температура вспышки паров, °С	Температура кипения, °С	λ , Вт/(м · К)	Применение
-45	0,01—0,02	Желтый	135—150	—	0,11—0,2	В высоковольтных трансформаторах и вводах
-45	0,01—0,02	»	160—162	—	0,15—0,18	Для пропитки конденсаторной бумаги и бумажно-масляной изоляции конденсаторов
-(10 ÷ 45)	0,01—0,07	От бесцветного до желтого	135—225	—	—	В маслonaполненных кабелях и кабелях с бумажно-масляной изоляцией
-40 ÷ -5	0,01—0,015	Бесцветный	200	221—350	0,1	Для пропитки силовых конденсаторов, силовых и специальных трансформаторов, для заполнения силовых трансформаторов
-(60 ÷ 70)	—	»	125—150	150—185	0,138—0,171	В импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах
-(60 ÷ 65)	—	»	172—220	250—300	0,138—0,153	В трансформаторах, специальных конденсаторах, радиоэлектронной аппаратуре, волноводах, магнетронах, преобразователях
-(90 ÷ 100)	—	»	200—320	200—315	0,115—0,127	То же

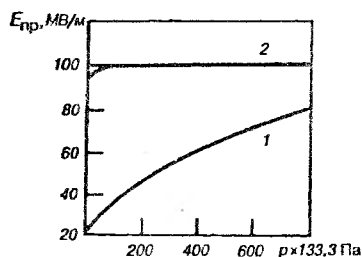


Рис. 14.4. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от давления:

1 — недегазированное; 2 — дегазированное

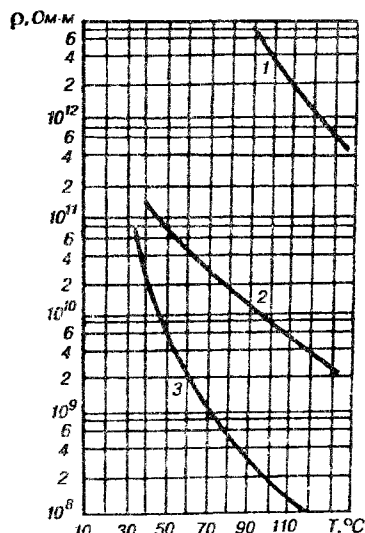


Рис. 14.5. Зависимость удельного объемного сопротивления жидких диэлектриков от температуры:

1 — трансформаторное масло тщательной очистки; 2 — промышленное трансформаторное масло; 3 — соево-

лности, напряженности электрического поля и других внешних воздействиях (рис. 14.1 — 14.5).

Все электроизоляционные жидкости можно подразделять по химической природе на две большие группы: 1) нефтяное масло (трансформаторное, конденсаторное и кабельное); 2) синтетические жидкости (хлорированные и фторированные углеводороды, кремнийорганические, фторорганические и др.). Однако возможно подразделение и по другим признакам: по применению, по верхнему пределу допустимой рабочей температуры, по степени горючести.

14.5. ТВЕРДЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Твердые электроизоляционные материалы представляют собой очень большую группу материалов, включающую в себя органические, элементо-органические и неорганические диэлектрики. К этой группе материалов условно, с точки зрения эксплуатации, можно отнести и твердеющие материалы (лаки, эмали, компаунды, клеи), которые в готовом изделии являются твердыми, хотя в технологическом процессе введения или нанесения их

они могут быть жидкими или пластичными. К твердым материалам относится большинство полимеров, бумага и картон, слоистые и пропитанные волокнистые материалы, намотанные изделия, все виды керамики, стекла, слюды и слюдосодержащие материалы, древесина и т. д.

Физико-химические свойства твердых электроизоляционных материалов зависят от внешних

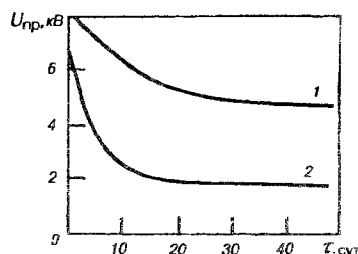


Рис. 14.6. Зависимость напряжения пробоя изоляции проводов диаметром 1,0 мм, эмалированных лаками ПИЗ-955 (1) и ПИЗ-943 (2), от продолжительности старения при 180 °С

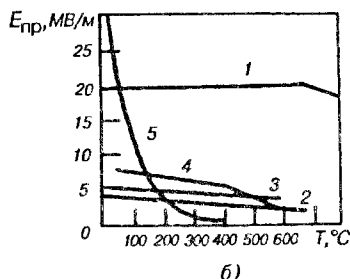
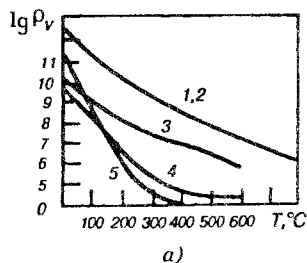


Рис. 14.7. Температурные зависимости электрического сопротивления (а) и электрической прочности (б) материалов:

1 — слюдопластовая бумага; 2 — периклаз; 3 — асбестовый пластик; 4 — кордситовая керамика; 5 — электрофарфор

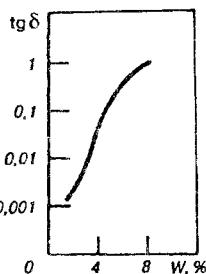


Рис. 14.8. Зависимость $\text{tg } \delta$ бумаги от содержания влаги

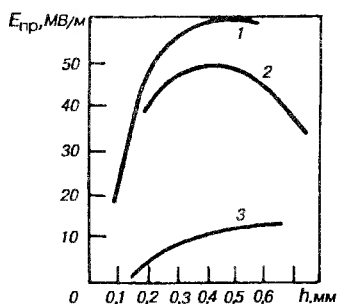


Рис. 14.9. Зависимость электрической прочности ленточной изоляции от толщины (при различном числе слоев):

1 — полиимидная пленка 35 мкм; 2 — полиимидная пленка 55 мкм; 3 — микалента ЛФК-ТТ 0,1 мм

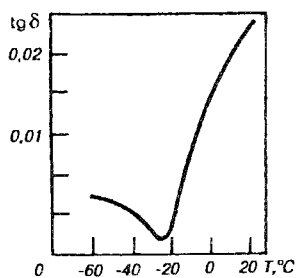


Рис. 14.10. Зависимость $\lg \delta$ электрокартона от температуры

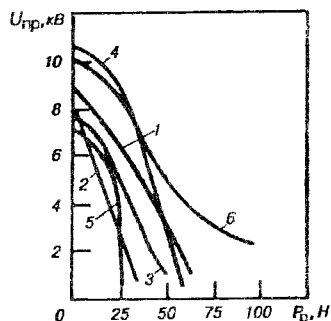


Рис. 14.11. Зависимость напряжения пробоя лакотканей от растягивающего усилия:

1 — ЛХМ-105 ($h = 0,15$ мм); 2 — ЛШМ-105 ($h = 0,10$ мм); 3 — ЛКМ-105 ($h = 0,10$ мм); 4 — ЛСБ-120/130 ($h = 0,17$ мм); 5 — ЛСК-155/180 ($h = 0,15$ мм); 6 — ЛСЭ-105/130 ($d = 0,15$ мм)

воздействий и условий окружающей среды (рис. 14.6—14.11), что позволяет иметь достаточно большой выбор для использования материалов в практических целях.

Свойства твердых электроизоляционных материалов, сгруппированных по принятой в электроматериаловедении классификации, представлены в табл. 14.4—14.11. Более подробные данные по свойствам твердых электроизоляционных материалов различных марок приведены в [14.11].

Т а б л и ц а 14.4

Электроизоляционные бумага и картон

Наименование и марка материала	Номинальная толщина, мкм	Плотность, кг/м ³	Разрывное усилие, Н	$\lg \delta$	$E_{пр}$, МВ/м	$U_{пр}$, В
Бумага конденсаторная (КОН-1, КОН-2, СКОН-1, СКОН-2, СКОН-3, МКОН, ЭМКОН, АНКОН)	4—30	750—1340	—	$(1,2 \div 3,2) \cdot 10^{-4}$	20—52	240—1500
Бумага кабельная (К, КМ, КМП, КВМ, КВМС, КВМСУ)	80—170	520—1150	$(83—186)/(35—83)$	$(1,9 \div 2,6) \cdot 10^{-4}$	—	—
Бумага трансформаторная (Т, ТМ, ТМП, ТВ, ТВУ)	80—120	720—1150	$(118—183)/(39—64)$	—	6,7—9,0	—
Бумага телефонная (КТ-50)	50	820	61/21	—	—	—
Бумага крепированная (ЭКТМ)	440	230	44,2	—	40*	—
Электрокартон для работы в воздушной среде (ЭВС, ЭВП, ЭВТ, ЭВ, ЭВА)	0,1—3,0 мм	950—1250	$(93—127)/(25—34)$	—	8—13	—
Электрокартон для работы в жидкости (АМ, А, Б, Г)	1,0—6,0 мм	880—1200	34,3—49**	$(1 \div 6) \cdot 10^{-2}$	10—12	40—85 кВ

* В масле при 90 °C.

** В поперечном направлении.

П р и м е ч а н и е. В графе «Разрывное усилие, Н» в числителе приведено значение усилия в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном. О применении бумаги и картона см. [14.11].

Т а б л и ц а 14.5

Полимерные органические диэлектрики

Наименование диэлектрика	Плотность, кг/м^3	Предел прочности при				Электрические параметры при 20 °С				λ , Вт/(м·К)	Тепло- стойкость по Мартенсу, °С	Холодо- стойкость, °С	ТК / (1— 100 °С), 10 ⁻⁴ 1/°С	Общие сведения и применение
		растя- жения, МПа	сжатия, МПа	стати- ческим изгибе, МПа	динами- ческим изгибе, кДж/м ²	ρ_v , Ом·м	ϵ_r , (f=50 Гц)	$\epsilon_g \delta$ (f=50 Гц)	$E_{пр}$, МВ/м					
Полиэтилен (высокого, среднего и низкого давления)	920—960	10—40	20—60	2—150	2—150	10 ¹³ —10 ¹⁵	2,2—2,4	(2÷4) 10 ⁻⁴	45—55	0,33—0,52	55—85	-50 ÷ -70	2,1—5,5	Непрозрачный термопластичный материал. Изготовление каркасов, панелей, гибкой изоляции
Полистирол	1050—1080	35—70	85—100	80—90	6—20	10 ¹³ —10 ¹⁵	2,4—2,6	(2÷3) 10 ⁻⁴	25—40	0,093—0,14	75—85	-60 ÷ -70	0,8	Прозрачный термопластичный материал. Изготовление катушек, лаков, пленок, нитей
Поливинилхлоридный пластикат	1200—1600	18—25	—	Не ломается	Не ломается	10 ¹⁰ —10 ¹²	6—8	(5÷8) 10 ⁻²	6—20	0,10	Температура размягчения 160—180	-35 ÷ -60	0,5—0,8	Гибкий материал. Изоляция и защитные оболочки кабелей, проводов; шланги и трубки
Винипласт	1350—1400	40—80	90—150	10—12	100—180	10 ¹⁰ —10 ¹²	3,2—4,0	(1÷5) 10 ⁻²	15—35	0,15—0,17	60—80	-25 ÷ -40	0,6—0,8	Термопластичный непорочный материал. Применяется для изготовления, огашения пленок, листов, трубок, стержней и уголков
Полипуретан	1170—1200	50—60	60—85	70—80	50—60	10 ¹² —10 ¹³	3—4,6	(8÷12) 10 ⁻³	20—25	0,313	60	-35	1,3—1,35	Материал с повышенной водостойкостью. Изготовление пористых пластиков и лаков
Поликапролактан (капрон)	1130—1160	50—80	60—80	80—95	100—170	10 ¹¹ —10 ¹²	3,6—5,2	(12÷27) 10 ⁻³	20	0,14—0,18	50—60	-25	0,9	Повышенная дугоустойчивость. Изготовление каркасов, пленок, нитей

О к о н ч а н и е т а б л . 14.5

Полиэтилен-терфталат (лавсан)	1300—1400	12—20	80—100	70—90	15—30	$10^{12}—10^{13}$	3,0—3,5	$(2 \div 6) \cdot 10^{-2}$	80—120	0,42	Температура размягчения 230—250	-55 ÷ -60	0,036	Прозрачный материал. Изоляция в виде пленок в электрических машинах низкого напряжения и в конденсаторах
Полиметилметакрилат	1180—1200	45—60	70—85	60—65	10—18	$10^{11}—10^{12}$	3,5—3,9	$(2 \div 6) \cdot 10^{-2}$	20—40	0,139—0,185	50—80	-60 ÷ -70	0,8	Прозрачный дугостойкий материал. Изготовленные оснований, панелей, трубок, шлангов, камер
Фторопласт-3	2090—2180	27—40	80—150	60—80	16—20	$10^{14}—10^{15}$	2,8—3,0	$(10 \div 15) \cdot 10^{-3}$	15—20	0,232	70—75	-180 ÷ +190	0,6—1,2	Водостойкий, негорючий материал. Изготовленные деталей для работы в условиях повышенной влажности, токов низкой частоты
Фторопласт-4	2100—2240	35—40	20—25	11—14	120—150	$10^{16}—10^{18}$	1,9—2,2	$(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$	35—50	0,252	200—250	-195 ÷ +200	0,8—2,1	Белый нагревостойкий, негорючий материал. Изготовленные пленок (конденсаторы, провода), радиодеталей, гибких печатных плат, лент, каркасов, вводов
Полиимид	1280—1480	160—180	170	50—100	35—50	$10^{15}—10^{16}$	3,5	$(1,2 \div 3) \cdot 10^{-3}$	22—30	0,15	Не размягчается до 430—440	-190	0,2	Нагревостойкий, негорючий, стойкий к радиационным воздействиям, труднорастворимый материал. Изготовленные пленок, эмалей, лаков, клеев

Т а б л и ц а 14.6

Слоистые пластмассы

Материал и марка	Плотность кг/м ³	Номи- нальная толщина листа, м	ρ_v , Ом · м	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{пр}$, МВ/м (1 слоем)	Длительная рабочая температу- ра, °С	σ_p , МПа	σ_n , МПа	Общие свойства и применение
Гетинакс (I, II, III, V, VI, VII, X, ЛП, VII-B)	1250—1450	0,2—50	$10^6—10^{11}$	5,5—8	0,02—0,4	1,2—3,5	-65 ÷ +150	4,5—120	60—140	I — для работы на воздухе и в трансформаторном масле при напряжении до 1 кВ на частоте 50 Гц; II — то же, но не нормируется коррозия; III — для работы при повышенной влажности и напряжении до 1 кВ; V — то же, что I, но при напряжении более 1 кВ или менее 1 кВ, но на частоте 1 МГц; VI — для работы на воздухе при напряжении до 1 кВ на частоте 1 МГц, имеет гладкую поверхность; VII — то же, но лучше $\operatorname{tg} \delta$ и пониженная стойкость к кратковременному нагреву; X — то же, что I, лучше штампуется; ЛП — для работы на воздухе при повышенной влажности и температуре; VII-B — влагостоек, для изготовления резисторов
Текстолит (А, Б, Г, В4, ЛП)	1250—1450	0,3—50	$10^6—10^{11}$	5—8	0,05— 0,19	2,2—2,5	-65 ÷ +105	35—98	70—140	A — для работы на воздухе и в трансформаторном масле, с повышенными электрическими свойствами; Б — для работы на воздухе, с повышенными механическими свойствами; Г — то же, что А, но имеет расширенные допуски по толщине и коррозия; В4 — для работы на воздухе на частоте 1 МГц; ЛП — для работы при повышенной влажности, водостоек, хорошая штампуемость
Стеклотекстолит (СТЭФ, СТЭД, СТЭБ, СТЭН, СТ-НГ, СТ-ЭФ, СТЭФ- НГ, СТК, СТБК, СТЭФ-П, СТЭФ- ПВ, РЭМ)	1400—2000	0,5—50	$20—10^{14}$	5,5—9	0,005— 0,1	6—27	-65 ÷ +180	70—320	95—400	СТ — для работы на воздухе при напряжении до 1 кВ, общего назначения; СТ-НГ — то же, но с более грубой структурой; СТЭФ — для работы на воздухе при напряжении более 1 кВ на частоте 50 Гц, а также при повышенной влажности и температуре с напряжением до 1 кВ, высокая механическая прочность при умеренной температуре; СТЭД — то же, но с повышенными электрическими и механическими свойствами и для работы в трансформаторном масле; СТЭБ — то же, но с пониженной горючестью; СТЭН — то же, но с повышенными механическими свойствами при высоких температурах; СТ-ЭТО — то же, но с повышенной теплоустойчивостью; СТЭФ-НГ — то же, но с более грубой структурой; СТК — то же, что СТЭФ, но хуже механическая прочность; СТБК — то же, но с высокой стабильностью при повышенной влажности; СТЭФ-П, СТЭФ-ПВ — полупроводящий; РЭМ — рулонный материал
Асбогекстолит: АСГ-А АСГ-Б	1500—1700 1500—1700	6,0—60 4,0—60	$10^6—10^7$ $10^6—10^7$	7—8 7—8	0,2—0,5 0,2—0,5	1,0—1,5 1,0—1	-65 ÷ +130 -65 ÷ +130	75 80	95—110 110	Для работы при повышенной температуре То же, но с более жесткой структурой и повышенными механическими свойствами
Древеснослоистые пластики (ДСП- Б-Э, ДСП-В-Э)	1300	1,5—60	$10^8—10^{10}$	7—8	0,06—0,3	5—9	—	137—225	180—274	ДСП-Б-Э — для изготовления деталей, работающих в трансформаторном масле; ДСП-В-Э — то же, но с повышенными электрическими характеристиками
Препреги: ПЭ, ПО ПЭ-1	—	0,35 0,06	—	—	—	20 20	—	—	—	Для скрепления витков провода пазовых частей электрических машин. Обеспечивается сохранение геометрических размеров катушек и облегчается вставление в паз. Материал на основе стеклоткани

Т а б л и ц а 14.7

Электроизоляционные компаунды

Классификация по применению и марка	Химическая природа	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С	Электрические параметры при 20 °С			Отверждение		Объемная усадка, %
				$\rho_{\text{пр}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$E_{\text{пр}}, \text{МВ/м}$	$\text{tg } \delta$ при 50 Гц	горячее	холодное	
Пролиточные:									
КП-18	Полиэфирный	Не размягчается	-50	10^{12}	28—33	0,02—0,03*		+	—
К-67, К-43	Кремнийорганические	То же	-60	$10^{12}—10^{13}$	20—50	(3—6) 10^{-3}	+		2,3—8
Д-1, ЭПК-4, ЭКА, ЭПСК, ПК-11	Эпоксидные	"	-(50—60)	$10^{12}—10^{13}$	20—30	0,006—0,25	+		0,5—1
Применяются для пропитки обмоток электрических машин, аппаратов, трансформаторов, дросселей, стержневых обмоток турбо- и гидротрансформаторов, для промазки стеклотекстильных лент									
Заливные:									
ВИЛАД-13-1	Полиуретановый	—	-60	10^{13}	35	0,013	+	+	—
МК-45	Маслоканифольный	45—48**	-8	$10^8—10^9$	14—16	—	Не отверждается		6—7
МБ-70/60, МБ-90/75, МБМ-1	Битумные	50—92**	-35 ÷ -10	$10^9—10^{12}$	14—17	—	То же		7—9
УП-5-199	Эпоксидный	—	-40	10^{10}	—	—		+	—
Применяются для заливки кабельных соединительных и концевых муфт и воронок, в трансформаторах, для изоляции мест разделки и соединения кабелей									
Плиточно-заливные:									
МБК-1	Материальный эфир	250	-60	$10^{10}—10^{11}$	10	0,03—0,05	+	+	5—8 (холодное отверждение не вызывает усадки)
К-115, К-168	Эпоксидно-полиэфирные	120	-60	$10^{10}—10^{12}$	20—30	0,06—0,09	+	+	0,5—1,5
УП-5-162	Эпоксидный модифицированный	Теплостойкость по Вика 109	-60	10^{14}	30	0,014***	+	(168)	—

Применяются для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов, заливки катушек и блоков электрических аппаратов, склейки и герметизации радиодеталей и узлов, заливки пустот, трещин и пор, для изготовления литой изоляции трансформаторов тока

* На частоте 1 000 Гц.

** Температура каплепадения (по Уббелюде).

*** На частоте 1 МГц.

Т а б л и ц а 14.8

Намотанные изделия

Наименование и марка	Основа	Внутренний диаметр, мм	Плотность, кг/м ³	Длина, мм	σ_c , МПа	σ_n , МПа	ρ_s , Ом	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{пр}$, МВ/м	Применение
Цилиндры:										
ЦБ	Бумажно-бакелитовый	105—1200	1050—1100	1010—2200	—	78—90	$10^8—10^{10}$	0,02—0,03	6—12	Барьерная изоляция трансформаторов большой мощности
ЦБФ	То же (с фольговой обкладкой внутри)	До 250	1070—1100	До 1500	—	—	—	0,03	5—8	Детали маслонаполненных вводов высокого напряжения при температуре $-65 \pm +105^\circ\text{C}$
ЦХ1, ЦХ2	Текстолитовые на бакелите	85—400	1080—1150	630; 830	45—55	80—90	$10^8—10^{10}$	0,01—0,04	8—12	Детали различной аппаратуры, работающие на воздухе и в трансформаторном масле. Диапазон температуры тот же
ЦСЭФ	Стеклотекстолитовый на эпоксидной смоле	105—600	1450—1500	650—950	—	—	$10^{10}—10^{11}$	0,03—0,04	3—5	Детали маслобъемных и нормальных масляных выключателей для работы в трансформаторном масле при температуре $-65 \pm +155^\circ\text{C}$
ЦСЭФВ	То же	90—140	1550	275—840	80—100	—	$10^{10}—10^{11}$	0,01—0,02	3,5—5	То же
ЦСК	Стеклотекстолитовый на кремнийорганике	105—400	1300—1500	650—950	35—45	—	$10^{10}—10^{12}$	0,02—0,03	2—5	Детали сухих шактных трансформаторов. Диапазон температур от $-65 \pm +180^\circ\text{C}$
Стержни	Текстолитовые на бакелите	8—60*	1250—1400	200—550	40—98	98—118	$10^8—10^{10}$	—	8—9	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе при нормальных условиях
Трубки:										
ТВ	Бумажно-бакелитовая	6—1200	1030—1100	200—2200	40—50	78—90	$10^8—10^{10}$	0,02—0,03	4—14	Изоляция выводных концов трансформаторных катушек. Применяется для работы в масле
ТХ	Текстолитовая на бакелите	10—80	1050—1080	630; 830	55—60	68—90	$10^8—10^{10}$	0,02—0,05	6—10	Защита проводов и тросов управления. Диапазон температуры $-65 \pm +105^\circ\text{C}$
ТСЭФ	Стеклотекстолитовая на эпоксидном связующем	10—100	1400—1450	650—950	70—80	180—200	$10^{10}—10^{11}$	0,02—0,03	3—4,5	Для работы в трансформаторном масле и на воздухе при температуре $-65 \pm +155^\circ\text{C}$
ТФБ	Фибробакелитовая	8—20	1050	283—1080	1,5	—	—	—	—	Для трубчатых разрядников серии РТФ на напряжение от 3 до 110 кВ. Диапазон температуры $-60 \pm +50^\circ\text{C}$

* Наружный диаметр мм.

Т а б л и ц а 14.9

Электроизоляционные материалы на основе слюды

Материал и марка	Толщина, мм	ρ_v , Ом·см	$E_{пр}$ МВ/м	Предельно допустимая рабочая температура, °C	Применение
Миканит коллекторный КФШ, КФГ, КФП, КФГС, КФА	0,4—1,2	10^{10} — 10^{12}	19—23	130—180	Прокладки между коллекторными пластинами в электрических машинах
Миканит формовочный ФФГ, ФФГА, ФФП, ФФПА, ФМП, ФМПА, ФФК, ФМК, ФМГ, ФФКА, ФМГА	0,15—1,5	10^{13}	25—41	130—180	Изделия фасонного профиля (конусы, коллекторные манжеты и т.п.)
Миканит прокладочный ПМГ, ПФГ, ПСГ, ПФК	0,5—5,0	10^{13}	16—34	130—180	Изоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах
Микалента ЛФЧ-ББ, ЛФЧ-ТБ, ЛМЧ-ББ, ЛМЧ-ТБ, ЛФС-ББ, ЛМС-ББ, ЛМР-СС, ЛФК-Т, ЛФК-ТТ, ЛФК-ТС, ЛМК-ТТ, ЛМК-ТС, ЛФС-ТБ, ЛФС-ТТ, ЛФС-ТС, ЛФЧ-Б, ЛФЭ-ТТ, ЛМЭ-ТТ, ЛФЭ-ТС	0,08—0,21	10^{10} — 10^{11}	9—28	130—180	Гибкий при комнатной температуре материал. Витковая изоляция секций машин постоянного и переменного тока, корпусная изоляция статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов, машин переменного тока. Изоляция обмоток магнитных систем, катушек электродвигателей электровозов
Микалекс	4—15	10^{12}	12—20	300—350	Твердый дугостойкий материал
Слюдитин коллекторный КСШ, КСЭ	0,40—2,0	10^{12} — 10^{13}	28—35	130—155	Электроизоляция между коллекторными пластинами по классу нагревостойкости F
Слюдитин гибкий Г ₁ СП, Г ₁ СК, Г ₁ СКН, Г ₂ СП, Г ₂ СК, Г ₂ СКН	0,10—0,30	10^{13} — 10^{14}	17—30	155—300	Пазовая и межвитковая изоляция в электрических машинах и аппаратах различного исполнения по классам нагревостойкости В, F, H и выше
Стеклослудитин формовочный нагревостойкий ФСКН-1, ФСКН-2	0,1—0,15	10^{11} — 10^{13}	28—38	180	Пазовая изоляция и электроизоляционные прокладки длительной нагревостойкости при 300 °C
Слюдопласт коллекторный КИФШ, КИФП, КИФК, КИФН-С	0,4—1,5	10^{12} — 10^{13}	16—24	130—200	Прокладка между пластинами в коллекторах электрических машин
Слюдопласт прокладочный ПИФШ, ПИФТ, ПИФША	0,3—1,5	10^{13} — 10^{14}	20—26	130—200	Электроизоляционные прокладки и шайбы в электрических машинах и аппаратах
Миканит гибкий ГМС, ГФС, ГМЧ, ГФЧ, ГМС-ББ, ГФС-ББ, ГМЧ-ББ, ГФЧ-ББ, ГФК	0,15—0,5	10^{13}	17—28	130—180	Пазовая и межвитковая изоляция, гибкие прокладки в электрических машинах
Стекломиканит гибкий ГФС-Т, ГФС-ТТ, ГФЭ-ТТ, ГФК-Т, ГФК-ТТ	0,2—0,6	10^{10} — 10^{12}	14—17	130—180	То же, но с повышенной нагревостойкостью
Микафолит МФГ-Б, МФШ-Б, ММГ-Б, ММШ-Б, МФГ-Т, МФГ-С, ММГ-Т, ММГ-С, МФП-Т, МФП-С, МФК-Т, МФК-С, ММК-Т, ММК-С	0,15—0,30	10^{11} — 10^{13}	14—19	155—180	Изоляционные гильзы, трубки и др. Пазовая изоляция статорных обмоток турбогенераторов, якорных секций машин переменного тока, изоляция полюсов сердечников, атулок, валов
Слюдопласт формовочный прессованный ФИФК-АПЛ, ФИП-АПЛ	0,25—0,35	10^{13} — 10^{14}	32—55	130—180	Изделия фасонного профиля, формирующиеся в нагретом состоянии. Коллекторные машины
Слюдопласт гибкий теплоустойчивый ГСФК-АФ	0,15; 0,3	10^{13} — 10^{14}	18—20	—	Пазовая изоляция электрических машин нагревостойкого исполнения
Слюдопластофолит ИФГ-Б, ИФГ-П, ИФГ, ИФГ-БП	0,15—0,3	10^{12} — 10^{13}	20—25	130	Изоляция роторных стержней и других частей электрических машин
Слюдопласт гибкий ИФГК, ИФГТ	0,2—0,5	10^{11} — 10^{13}	17—28	130—180	Пазовая изоляция низковольтных электрических машин

О б о з н а ч е н и я : Миканиты: 1-я буква: К — коллекторный, Ф — формовочный, П — прокладочный, Г — гибкий, М — микафолит, Л — микалента; 2-я буква: Ф — слюда флогопит, М — мусковит, С — смесь; 3-я буква (вид связующего): Г — глифтал, П — полиэфир; А — аммоний фосфорно-кислый, Ш — шеллак, К — кремнийорганическая смола, С — масляно-глифталевый лак, Ч — масляно-битумный лак, Р — каучук (резина), Э — эпоксидно-эфирный лак; 4-я буква (кроме гибкого миканита): А — пониженное содержание связующего, Б — одна подложка из бумаги, Т — то же из стеклоткани, С — стеклосетка односторонняя. Слюдитины: 1-я буква: то же, что и у миканитов; 2-я буква: С — слудитин; 3-я буква то же, что и у миканитов; дополнительная буква Н — нагревостойкий. Слюдопласты: 1-я буква то же, что и у миканитов, И — слюдопласт, Ф — флогопит (2-я или 3-я буква).

Т а б л и ц а 14.10

Электроизоляционные лакоткани

Основа и марки лакоткани	Номинальная толщина, мм	Удельная разрывная нагрузка, Н/см, по основе	ρ_v , Ом·м	$U_{пр}$, кВ (при 15—38 °С, $\varphi = 45—75\%$)	Нагревостойкость, °С	Применение
Хлопчатобумажная ЛХМ, ЛХМС, ЛХММ, ЛХБ	0,15—0,30	38—92	$10^{11}—2,5 \cdot 10^{13}$	4—10,5	105	Для работы на воздухе и в горячем трансформаторном масле
Шелковая ЛШМ, ЛШМС	0,04—0,15	9—24	$4 \cdot 10^{11}—10^{13}$	1,0—9,8	105	Для работы на воздухе, возможно кратковременное повышение температуры
Капроновая ЛКМ, ЛКМС, ЛКТМ	0,10—0,17	24—36	$10^{11}—10^{13}$	3,3—9,8	105	Для работы на воздухе (ЛКМС допускает работу в масле)
Стеклопленочная ЛСМ, ЛСЛ, ЛСММ, ЛСЭ, ЛСБ, ЛСП, ЛСКР, ЛСБК, ЛСПК, ЛСКК, ЛСЛК, РСК	0,03—0,24	20—170	$10^{10}—7 \cdot 10^{13}$	0,7—10,8	120—250	Для работы на воздухе, в трансформаторном масле, при повышенной влажности, в том числе в тропиках, для изготовления композиционных материалов. Возможно изготовление полупроводящих лакотканей
Ф-4Д-Э01, Ф-4Д-Э003, Ф-4Д-М-006	0,03—0,1	539—745*	$10^{12}—10^{13}$	8—60**	250	Для работы при температуре от -100 до 250 °С

* $\sigma \cdot 10^{-5}$, МПа.** $E_{пр}$ при постоянном напряжении, МВ/м.

П р и м е ч а н и е. В маркировке лакотканей используют буквы: Л — лакоткань (1-я буква), Х — хлопчатобумажная, Ш — шелковая, К — капроновая, С — стеклянная ткань (2-я буква), С — светлый лак, Ч — черный лак, Э — эскапоновый лак, К — кремнийорганический лак, М — масляный лак, Б — масляно-битумный лак, Л — бутадистирольный латекс, П — полиэфирно-эпоксидный лак, КР — на основе кремнийорганической резины (стоят на 3-й позиции), С — специальная, М — маслостойкая; стеклолакоткани на основе фторопластов: Ф-4Д — суспензия фторопласта 4Д или 4ДУ (Ф-4Д-М-1-006), Э — электроизоляционная, цифры — толщина, мм.

Т а б л и ц а 14.11

Электроизоляционные лаки

Классификация по основе и марка	Термозластичность, ч, при 150 °С, не менее	Режим сушки		ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	Применение
		горячий	холодный			
Масляно-канифольные 152, 202, КО-965	1—8	+		$10^{10}—10^{12}$	50—70	Пропиточные и покровные
Масляно-битумные БТ-987, БТ-988, БТ-99	5—10	+	+	$10^{12}—10^{13}$	55—60	Пропиточные и покровные
Масляно-алкидные ГФ-985, МЛ-92, ГФ-95, ГФ-957	20—50	+	+	$10^{12}—10^{13}$	30—70	Пропиточные, покровные и клеящие
Полиэфирные ПЭ-943, ПЭ-936, ПЭ-9153	48	+		$10^{11}—5,3 \cdot 10^{13}$	50—100	Клеящие и пропиточные, для изготовления эмалей
Полиэфирно-эпоксидные ПЭ-933, ПЭ-935, ПЭ-970	10—48	+		$10^{12}—10^{13}$	70	Пропиточные, клеящие
Водно-эмульсионные 321-Т, ПФЛ-88	17—20	+		10^{11}	30—45	Пропиточные
Полиэфиризоциануратные ПЭ-993, ПЭ-9132	50 (180 °С)	+		$10^{12}—10^{13}$	70—80	Пропиточные
Кремнийорганические КО-916, КО-964, КО-917, КО-990, КО-919Т	30—200	+	+	$10^{11}—10^{13}$	50—75	Пропиточные, промазочные, клеящие и герметизирующие

14.6. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В соответствии с принятой в настоящее время классификацией группу керамических материалов составляют твердые вещества неорганического происхождения, основными классификационными признаками которых являются: способ получения (керамическая технология), структура (поликристаллические многофазные системы), особые характерные свойства: электрические (высокая электрическая прочность, стойкость к электрическому и тепловому старению), механические (высокая механическая прочность, твердость, отсутствие деформаций при длительном приложении нагрузки), тепловые (исключительно высокая нагревостойкость), физико-химические (стойкость к действию агрессивных сред, малая гигроскопичность и водопроницаемость, вакуумная плотность, стойкость к воздействию излучений высоких энергий). Совокупность столь уникальных свойств обуславливает широкое применение керамических материалов в современной электротехнике, электроэнергетике и радиотехнике. Во многих видах электротехнической аппаратуры удельный вес керамических изделий составляет свыше 80 %.

В зависимости от назначения и области применения керамические материалы принято делить на подгруппы, включающие материалы с определенными электрофизическими параметрами и составом.

Изоляторные электро- и радиокерамические материалы. Изоляторные материалы используются для изготовления изоляторов различных типов: линейных (подвесные, подвесные стержневые, штыревые), опорных, проходных (вводы), телеграфных и телефонных, аппаратных (используются в конструкциях различных электрических аппаратов); установочных изделий (ролики, детали предохранителей, патронов, штепсельных соединений); для изготовления установочных изделий в радиотехнике и микроэлектронике: ламповых панелей, каркасов катушек индуктивности, осей, антенных изоляторов (опорных, проходных, подвесных), изоляционных оснований плат в микромодулях и толстопленочных микросхемах, деталей корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Часто изоляторные керамические материалы помимо основной функции выполняют также функции конструктивных элементов аппаратуры, подвергаясь при эксплуатации воздействию значительных механических нагрузок. В связи с этим выбор изоляторного материала для конкретного применения следует производить с учетом его механических характеристик. Основные свойства широко применяемых изоляторных электро- и радиокерамических материалов приведены в табл. 14.12, 14.13, зависимость основных электрических характеристик от температуры — на рис. 14.12—14.16.

Конденсаторные керамические материалы. В качестве диэлектрика в современных низкочастотных и высокочастотных конденсаторах по-

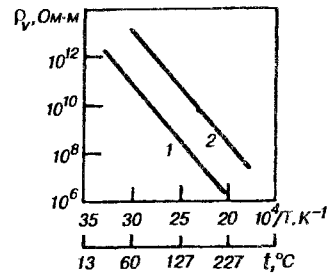


Рис. 14.12. Зависимость удельного электрического сопротивления изоляторного фарфора (1) и радиофарфора (2) от температуры

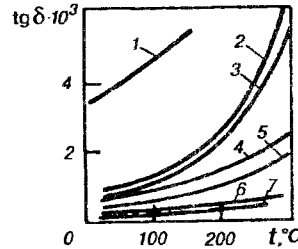


Рис. 14.13. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ установочной радиокерамики при $f = 1$ МГц: 1 — радиофарфор; 2 — ультрафарфор УФ-46; 3 — стеатит С-55; 4 — шпинелевая керамика Ш-15; 5 — ультрафарфор УФ-53; 6 — цезиановая керамика ЦМ-4; 7 — корундовая керамика

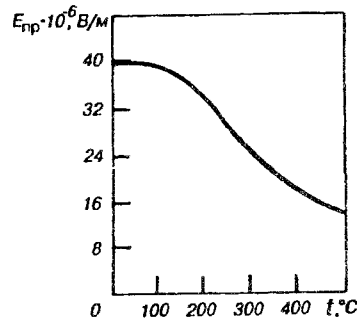


Рис. 14.14. Зависимость напряженности пробоя цезиановой керамики ЦМ-4 от температуры при постоянном напряжении

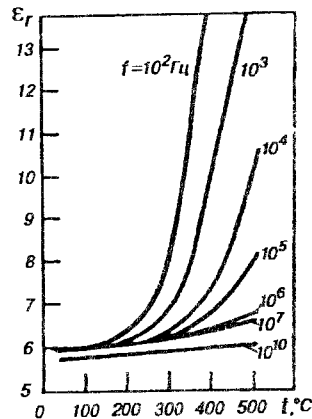


Рис. 14.15. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости стеатитовой керамики при различных частотах

Т а б л и ц а 14.12

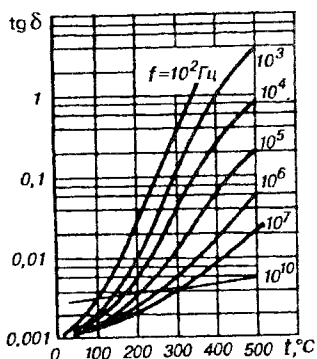
Основные характеристики изоляторов электрических материалов (по ГОСТ 20419-83)

Основные показатели	Материалы						
	электротехнический фарфор	стеатиты	кордиерит	цельзиан	пористые алюмосиликаты магия	муллитокорундовая керамика	корундовые
Плотность γ , 10^3 кг/м ³	2,45—2,7	2,8	—	—	2,1—2,2	3,4	3,5—3,9
Кажущаяся пористость P_k , %	0—1,5	0—0,7	0,5	0,5	20—40	0	0
Прочность на изгиб $\sigma_{\text{и}}$, МПа, не менее	30—140	90—120	50	70	15—40	120—240	200—300
Прочность на растяжение σ_r , МПа, не менее	30—60	45	25	25	—	—	—
Прочность на сжатие σ_c , МПа, не менее	—	500—600	300	—	—	—	—
Ударная прочность σ_y , кДж/м ² , не менее	1,3—2,5	2,2—2,5	1,8	2,0	0,8—1,4	3,0—3,5	3,8—4,0
Модуль упругости E , МПа $\cdot 10^3$, не менее	60—100	60—80	90	—	40	100—150	200—300
Коэффициент термического линейного расширения α , 10^{-6} К ⁻¹ , при 20—100 °С	3—8	5—9	0,5—2,0	3—5	3—5	3—6	4,5—7
Удельная теплоемкость C_p , Дж $\cdot$ кг ⁻¹ $\cdot$ К ⁻¹ , при 20—100 °С	800—900	800—900	800—1200	800—1000	750—900	850—1050	850—1050
Коэффициент теплопроводности λ , Вт $\cdot$ м ⁻¹ $\cdot$ К ⁻¹ , при 20—100 °С	1—3	1—3	1,5—2,5	1,5—2,5	1—2	2—15	10—30
Стойкость к термоударам Δt , К	150—160	80—100	250	200	150—350	150—170	140—180
Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ кВ/мм, при 50 Гц, не менее	20—30	20	10	20	—	17—20	10—17
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , при 50 Гц	5,0 — 7,5	5,0 — 7,0	4,0—6,0	—	—	6,5—8,5	7 — 10
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \cdot 10^3$, при 50 Гц	25 — 30	5 — 25	25	10	—	—	0,2 — 1
Удельное объемное сопротивление при постоянном токе ρ_v , Ом $\cdot$ см	10^{11} — 10^{13} при 20 °С, 10^4 при 600 °С	10^{13} при 20 °С, 10^4 — 10^5 при 600 °С	10^8 при 200 °С, 10^4 при 600 °С	10^{14} при 200 °С, 10^9 при 600 °С	10^9 — 10^{10} при 200 °С, 10^5 при 600 °С	10^{13} при 20 °С, 10^6 при 600 °С	10^{14} при 20 °С, 10^8 при 600 °С
Удельное поверхностное сопротивление ρ_s , Ом	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{12}	—	10^{10}	—

Т а б л и ц а 14.13

Основные характеристики изоляторных радиокерамических материалов

Основные показатели	Рекомендуемая область применения				
	Для деталей с рабочей температурой 300 °С	Для малогабаритных деталей массового производства	Для крупногабаритных деталей и деталей сложной конфигурации	Для антенных изоляторов и деталей средств связи	Для оснований изоляторов и других установочных деталей электронной техники
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r при 20 ± 5 °С	7,5—9	7,5	8—10,5	8	7,5
Температурный коэффициент емкости, 10^{-6} К^{-1}	60 ± 20 — 100 ± 30	100 ± 30	100 ± 30 — 120 ± 30	150 ± 30	200 ± 100
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$, не более	0,0004 при 25 °С 0,0012 при 300 °С	0,001 при 25 °С 0,0015 при 85 °С	0,002 при 25 °С 0,004 при 200 °С	0,0030 при 25 °С 0,0040 при 85 °С	0,0050 при 25 °С 0,0100 при 200 °С
Удельное объемное сопротивление при постоянном токе ρ_v , Ом · см	$1 \cdot 10^{12} — 1 \cdot 10^{13}$ при 300 °С	$1 \cdot 10^{12}$ при 125 °С	$1 \cdot 10^{12}$ при 125 °С	$1 \cdot 10^{12}$ при 125 °С	$1 \cdot 10^{11}$ при 125—200 °С
Электрическая прочность $E_{пр}$, кВ/мм, не менее	25	20	20	20	18
Прочность на изгиб $\sigma_{из}$, МПа	78—147	127—37	147—274	137	59—98
Коэффициент термического линейного расширения α , 10^{-6} К^{-1}	1,8—11	5—8	3—6,5	5,5—7,5	2,8—5,5

Рис. 14.16. Зависимость $\text{tg} \delta$ статитовой керамики от температуры при различных частотах

стоянной и полуперменной (подстроечные конденсаторы) емкости широко используются керамические материалы, обеспечивающие высокую удельную емкость, незначительное изменение диэлектрической проницаемости при изменении температуры, малые диэлектрические потери, высокую электрическую прочность. Основные конденсаторные материалы относятся к титаносодержащей, станнатной или цирконатной группам, поскольку кристаллическая фаза этих материалов представлена соединениями титана, олова, циркония. В таких материалах наблюдается линейная поляризация. Особую группу конденсаторных материалов составляют сегнетокерамические матери-

алы с высокой диэлектрической проницаемостью на основе титаната бария и титанатов других металлов (Sr, Ca, Pb, Nb, Cd). Диэлектрическая проницаемость в них достигает значений 1000—10 000. Существенный недостаток сегнетокерамики — сильная зависимость ϵ_r и $\text{tg} \delta$ от температуры и частоты, что ограничивает область их применения. Обычно это диэлектрики в малогабаритных низкочастотных конденсаторах низкого напряжения, так как $E_{пр}$ этих материалов невелика. Сегнетоэлектрики характеризуются зависимостью ϵ_r от напряженности электрического поля. Разработаны керамические материалы, у которых эта зависимость выражена очень резко. Такие материалы применяются в качестве диэлектриков в нелинейных конденсаторах — варикондах, используемых в датчиках температуры и электромеханических преобразователях, переключающих и запоминающих ячейках счетно-решающих устройств, диэлектрических усилителях и умножителях частоты. Качество активного диэлектрика вариконда характеризуется коэффициентом нелинейности его вольт-фарадной характеристики, равным отношению ϵ_r в сильном поле (определенном для каждого конкретного материала) к ее значению в слабом поле (2—5 кВ/м). Основные характеристики конденсаторных материалов различных типов приведены в табл. 14.14—14.16, зависимости ряда параметров от температуры, частоты, напряженности электрического поля представлены на рис. 14.17—14.21.

Т а б л и ц а 14.14

Характеристики конденсаторных электротехнических материалов (по ГОСТ 20419-83)

Основные показатели	Материалы на основе оксида титана (рутиловая керамика)	Материалы на основе титаната кальция (перовскитовая керамика)	Материалы на основе стронций-висмутового титаната (СВТ)	Материалы на основе титаната бария с ϵ_r до 3000	Материалы на основе титаната бария, стронция, висмута	Материалы на основе титана бария с ϵ_r свыше 3000	Материалы на основе титаната бария, стannата и цирконата кальция
Кажущаяся плотность ρ_x , 10^3 кг/м ³ , не менее	3,5	3,0	5,0	4,0	5,0	4,0	5,0
Кажущаяся пористость P_x , %, не более	0	0	0	0	0	0	0
Прочность на изгиб σ_H , МПа, не менее	70	70	70	50	50	50	50
Коэффициент термического линейного расширения α , 10^{-6} К ⁻¹ , при 20—100 °С	6—8	—	6—8	—	—	—	6—8
Удельная теплоемкость C_p , Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹ , при 20—100 °С	700—800	—	—	—	—	—	—
Коэффициент теплопроводности λ , Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹ , при 20—100 °С	3—4	—	—	—	—	—	—
Электрическая прочность $E_{пр}$, кВ/мм, при 50 Гц, не менее	8	6	6	2	2,5	2	2,5
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , при : 50 Гц 1 кГц	40—100 —	130—150 130—150	800—1000 800—1000	350—3000 —	1800—2500 1800—2500	Свыше 3000 —	8500 8500
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^3$ при 1 кГц, не более	6,5	1,0	3,0	—	5,0	—	30
Удельное объемное сопротивление ρ_v , при постоянном токе, Ом · см, при 20 °С, не менее,	10^{12}	10^{11} $\rho_v = 10^{10}$ Ом	10^{11}	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}

Т а б л и ц а 14.15

Характеристики конденсаторных радиокерамических материалов

Основные показатели	Рекомендуемая область применения				
	Для контурных и разделительных конденсаторов, не определяющих стабильности частоты	Для контурных термокомпенсирующих и разделительных конденсаторов	Для конденсаторов высокой стабильности	Для однополюсных импульсных конденсаторов и конденсаторов низкой частоты и постоянного тока	Для конденсаторов низкой частоты и постоянного тока
ϵ_r при $20 \pm 5^\circ\text{C}$	100—240	30—240	7—30	900	1400—9000
ТК ϵ_r , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$	$(-1000 \pm 200) \div (3300 \pm 1000)$	$(-150 \pm 40) \div (+100 - 150)$	$(-75 \pm 30) \div (+100 \pm 30)$	± 30	$(\pm 10) \div (\pm 70)^*$
$\text{tg } \delta$, 10^{-4} при:					
$25 \pm 10^\circ\text{C}$	6—8	6—8	6—12	20	250—500
$85 \pm 3^\circ\text{C}$	8—10	8	8—10	—	200
$100 \pm 3^\circ\text{C}$	10	10	—	—	—
$125 \pm 5^\circ\text{C}$	—	—	—	20	20
$155 \pm 5^\circ\text{C}$	12	12	12—18	—	300 при $200 \pm 5^\circ\text{C}$
ρ_v , Ом · м, при:					
$100 \pm 3^\circ\text{C}$	10	10	10	10 при $125 \pm 5^\circ\text{C}$	10
$155 \pm 5^\circ\text{C}$	10	10	10	—	10 при $200 \pm 5^\circ\text{C}$
$E_{\text{пр}}^{**}$, МВ/м	5—8	6—8	8	5	3—4
σ_k^{**} , МПа	59—78	59—78	69—78	49	49
ТК l , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$	12	12	12	12	12

* Не более.

** Не менее.

Т а б л и ц а 14.16

Основные характеристики высоконелинейных керамических материалов для варикондов

Материал	Температура Юри, $^\circ\text{C}$	ϵ_r при $E = 0,002—0,005$ МВ/м, $t = 20^\circ\text{C}$	$\epsilon_r \text{ max}$ при $E = E_{\text{max}}$	E_{max} , МВ/м	Коэффициент нелинейности $K_{\text{н}}$
ВК-1*	75 ± 10	2300—2500	16 000 — 20 000	0,15—0,20	4
ВК-2	75 ± 10	2000—2500	40 000— 50 000	0,12—0,15	8
ВК-4**	105 ± 10	1800—2000	20 000 — 35 000	0,25—0,30	8
ВК-5	75 ± 10	2000—3000	80 000— 100 000	0,08—0,10	20
ВК-6***	200 ± 20	400—500	10 000 — 22 000	0,50—0,60	8 (до 30)

* Простая технология.

** Стабильные характеристики ϵ_r и $K_{\text{н}}$ в интервале температуры $20—80^\circ\text{C}$.

*** Высокая стабильность параметров и прямоугольность петли гистерезиса.

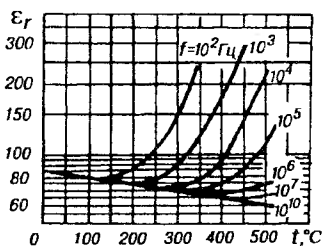


Рис. 14.17. Зависимость диэлектрической проницаемости рутитовой керамики от температуры при различных частотах

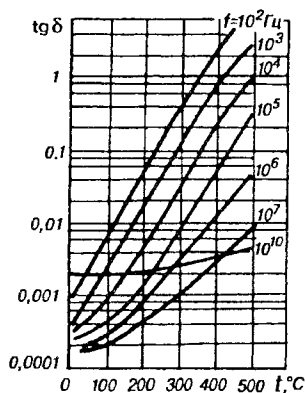


Рис. 14.18. Температурная зависимость $\text{tg } \delta$ рутитовой керамики при различных частотах

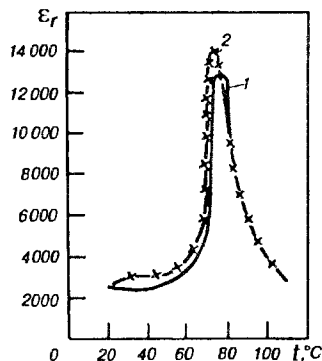


Рис. 14.19. Зависимость диэлектрической проницаемости материалов от температуры при напряженности поля 5 В/мм и частоте 1000 Гц:
1 — ВК-1; 2 — ВК-2

Пьезоэлектрические керамические материалы. Пьезоэлектрики характеризуются ярковыраженным пьезоэлектрическим эффектом, заключающимся в изменении поляризации или электрической индукции под действием механического напряжения (прямой пьезоэффект) или деформации материала под воздействием электрического

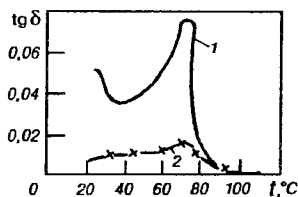


Рис. 14.20. Зависимость $\text{tg } \delta$ материалов от температуры при напряженности поля 5 В/мм и частоте 1000 Гц:
1 — ВК-1; 2 — ВК-2

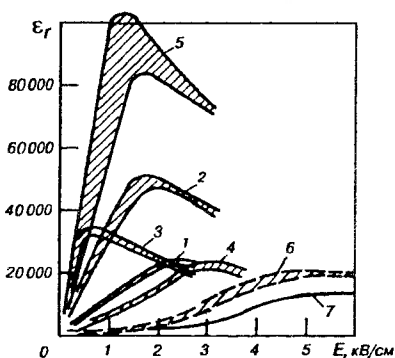


Рис. 14.21. Зависимость диэлектрической проницаемости высоконапряженных конденсаторных материалов от напряженности поля:
1 — ВК-1; 2 — ВК-2; 3 — ВК-3; 4 — ВК-4; 5 — ВК-5; 6 — ВК-6; 7 — BaTiO₃

поля (обратный пьезоэффект). Пьезоэлектрическая керамика широко применяется в радиоэлектронике и электромеханике в качестве активных материалов для изготовления резонаторов, частотно-избирательных фильтров, трансформаторов тока и напряжения, линий задержки, датчиков механических величин, пьезоэлектрических двигателей. Основными характеристиками пьезоэлектриков являются пьезомодуль — коэффициент пропорциональности между изменением поляризации вещества или плотности заряда на поверхности пьезоэлектрика и механическим напряжением и коэффициент электромеханической связи, характеризующий долю электрической энергии, преобразующейся пьезоэлектриком в механическую энергию. Промышленные пьезоэлектрические материалы — сегнетоэлектрики на основе титана бария с модифицирующими добавками, позволяющими управлять параметрами материала: температурой Кюри, температурной стабильностью, диэлектрическими и электромеханическими постоянными; твердые растворы цирконата-титана свинца (ЦТС); ниобата бария-свинца (КНБС). Технические характеристики промышленных пьезоэлектрических материалов представлены в табл. 14.17.

Т а б л и ц а 15.17

Некоторые характеристики отечественных пьезоэлектрических материалов

Основные показатели	Материал										
	ТБК-3	НБС-3	ЦТС-19	ЦТС-23	ЦТСНВ-1	ЦТБС-3	ЦТСС-1	ПКД-124Т	ПКД-501	ПКР-5	ПКР-10
Диэлектрическая проницаемость ϵ_r	1200	1800	1500	1050	2050	2400	1000	970	1800	350	380
$\operatorname{tg} \delta \cdot 100^*$	2,0	2,5	3,5	0,75	—	1,5	0,8	0,5	0,5	0,27	0,30
Температура Кюри, °С	105	270	290	280	—	453	548	300	—	325	297
Коэффициент электро-механической связи	0,25	0,20	0,40	0,43	0,45	0,45	0,43	0,52	0,60	0,46	0,48
Добротность	300	300	50	200	70	200	500	1200	500	2400	2800
Скорость звука, м/с	4700	4000	3300	3200	2900	3600	3500	—	—	3800	3300
Плотность γ , кг/м ³	3500	5500	7000	7400	7300	7100	7300	7500	7500	7700	8000

*В слабых полях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 14.1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. М.: Энергоиздат, 1981.
- 14.2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
- 14.3. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытания электроизоляционных материалов и изделий. Л.: Энергия, 1980.
- 14.4. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 14.5. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. М.: Энергия, 1976.
- 14.6. Пешков И.Б. Обмоточные провода. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 14.7. Поплашко Ю.М. Физика диэлектриков. Киев: Вища школа, 1980.
- 14.8. Полупроводники на основе титаната бария/ Под ред. Окадзаки К. М.: Энергоиздат, 1982.
- 14.9. Производство кабелей и проводов/ Н.И. Белоруссов, Р.М. Лакерник, Э.Т. Ларина и др.; Под ред. Н.И. Белоруссова и И.Б. Пешкова. М.: Энергоиздат, 1981.
- 14.10. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: Справочник/ Под ред. Н.А.Сидорова, В.К.Князева. М.: Советское радио, 1976.
- 14.11. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т./ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева и др. М.: Энергоатомиздат. Т. 1, 1986; Т. 2, 1987.
- 14.12. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
- 14.13. Технология электрокерамики/ Г.Н. Масленникова, Ф.Я. Харитонов, Н.С. Костюков и др. М.: Энергия, 1974.
- 14.14. Шефтель В.О. Полимерные материалы. Токсические свойства (справочник). Л.: Химия, 1982.
- 14.15. Электрические изоляторы/ Н.С. Костюков, Н.В. Минаков, В.А. Князев и др. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 14.16. Электротехнические материалы: Справочник/ В.Б. Березин, М.С. Прохоров, Г.А. Рыков и др. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 14.17. Электрофизические основы техники высоких напряжений/ И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др. М.: Энергоатомиздат, 1993.

Раздел 15

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

15.1. Термины и определения	326	15.5. Основные параметры полупроводни-	
15.2. Требования, предъявляемые к полу-		ковых материалов и методы их изме-	
проводниковым материалам	327	рения	336
15.3. Кристаллическая структура полупро-		15.6. Аморфные полупроводники	339
водников	328	Список литературы	345
15.4. Классификация полупроводниковых			
материалов	330		

15.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Полупроводник — вещество, основным свойством которого является зависимость его электропроводности от воздействия внешних факторов (под внешними факторами понимаются температура, электрическое поле, излучения и т.д.). Для полупроводников характерен экспоненциальный рост электропроводности с увеличением температуры. Удельное сопротивление этих материалов находится в диапазоне от 10^{-3} до $10^{10} - 10^{12}$ Ом · см.

Собственный полупроводник — полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность.

Монокристалл — целостный кристалл с ориентацией блоков не более $1-2^\circ$, который является трехмерным образованием из тождественных элементарных ячеек.

Аморфный полупроводник — полупроводник, характеризующийся отсутствием дальнего порядка в расположении атомов.

Дефект — искажение решетки реального кристалла, вызванное нарушением периодичности расположения атомов, последовательности в расположении атомных слоев, а также создаваемое введенными атомами примеси.

Энергетическая зона — область значений полной энергии электронов в кристалле полупроводника.

Разрешенная зона — энергетическая зона или совокупность перекрывающихся в результате расщепления энергетических уровней изолированных атомов в процессе образования структуры кристалла.

Запрещенная зона — область значений энергии, которыми не могут обладать электроны в полупроводнике.

Зона проводимости — свободная зона полупроводника, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны проводимости.

Свободная зона — разрешенная зона полупроводника, в которой отсутствуют электроны проводимости при абсолютном нуле температуры.

Валентная зона — верхняя из заполненных зон полупроводника, в которой при абсолютном нуле температуры все энергетические уровни заняты электронами.

Ширина запрещенной зоны — разность энергий

между нижним уровнем зоны проводимости и верхним уровнем валентной зоны полупроводника.

Уровень Ферми — энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5 при температурах, отличных от температуры абсолютного нуля.

Носитель заряда — частица, содержащая один или несколько электрических зарядов. Носителями заряда являются, например, электрон, протон, ион; термин относится условно также к дырке в полупроводнике.

Эффективная масса носителя заряда — величина, имеющая размерность массы и характеризующая движение заряда в полупроводнике под воздействием внешнего электромагнитного поля.

Эффективное сечение захвата — величина, имеющая размерность площади и обратная произведению концентрации носителей заряда данного типа в полупроводнике на средний путь, проходимый носителями от освобождения до захвата.

Подвижность носителей заряда — отношение средней установившейся скорости перемещения носителей заряда в направлении электрического поля к напряженности последнего.

Длина свободного пробега носителей заряда — среднее расстояние между двумя последовательными соударениями носителей заряда.

Коэффициент диффузии носителей заряда — отношение плотности потока к градиенту концентрации носителей заряда в отсутствие электрического и магнитного полей.

Диффузионная длина — расстояние, на котором в однородном полупроводнике при одномерной диффузии в отсутствие электрического и магнитного полей избыточная концентрация неосновных носителей заряда уменьшается вследствие рекомбинации в e раз.

Скорость поверхностной рекомбинации — отношение плотности потока носителей заряда, рекомбинировавших на поверхности полупроводника, к концентрации избыточных носителей у поверхности.

Собственная концентрация носителей заряда — концентрация равновесных носителей заряда в собственном полупроводнике.

Легирование — процесс управляемого изменения физических свойств полупроводника путем введения примесей в решетку кристалла.

Легированный элемент — химический элемент, атомы которого введены в решетку кристалла для изменения его свойств.

Акцептор — дефект решетки, способный при возбуждении захватывать электрон из валентной зоны.

Донор — дефект решетки, способный при возбуждении отдавать электрон в зону проводимости.

Акцепторная примесь — примесь, атомы которой являются акцепторами.

Донорная примесь — примесь, атомы которой являются донорами.

15.2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ МАТЕРИАЛАМ

Основное отличие полупроводников от других материалов, в частности металлов, связано с различием в их электронной структуре, с характером заполнения валентными электронами зон разрешенных энергий. В полупроводниках валентная зона заполнена при 0 К полностью и отделена от зоны проводимости запрещенной зоной, ширина которой различна у различных полупроводников. Поэтому, для того чтобы в полупроводнике стала возможной электропроводность, электроны из валентной зоны или с примесных донорных уровней в запрещенной зоне должны быть «заброшены» в зону проводимости, а также на созданные легированием акцепторные уровни в запрещенной зоне. В последнем случае носителями заряда становятся положительно заряженные «дырки» в валентной зоне.

Эти особенности полупроводников создают чрезвычайно интересные и многообразные возможности. Они позволяют изменять электропроводность за счет изменения концентрации носителей заряда на несколько порядков, что дает возможность создавать устройства, в которых непосредственно в твердом теле имеются области с проводимостью разного типа, граница между которыми (так называемый *p-n*-переход) может служить для выпрямления и усиления сигналов. Возбуждение атомов создает условия для детектирования разных излучений и внешних воздействий, а переход возбужденного атома в стабильное состояние позволяет генерировать различного рода излучения. Создаются широчайшие возможности для преобразования одних видов энергии (электрической, тепловой, механической, энергии частиц и излучений) в другие.

На основе полупроводниковых материалов создано много различных полупроводниковых устройств и приборов. Свойства, параметры и характеристики этих приборов в значительной степени определяются свойствами и параметрами исходного полупроводникового материала. Поскольку принцип действия большинства полупроводниковых приборов (диодов, стабилитронов, транзисторов, тиристоров и т.д.) основан на использовании свойств выпрямляющего *p-n*-перехода, то такие приборы будут работоспособны только

при температуре, соответствующей примесной электропроводности. Собственная электропроводность, появляющаяся при высокой температуре, нарушает нормальную работу прибора. Максимальная допустимая температура полупроводникового прибора в первую очередь определяется шириной запрещенной зоны исходного полупроводникового материала. Таким образом, для изготовления прибора, работающего при высоких температурах, следует использовать широкозонный полупроводниковый материал. Кроме того, приборы на основе широкозонного полупроводникового материала будут работать с большой допустимой мощностью рассеяния, т.е. при нормальных условиях работы могут быть уменьшены габариты прибора или габариты теплоотводящих радиаторов.

С появлением полупроводниковых приборов сразу же возникла необходимость в улучшении их частотных свойств, в повышении напряжения пробоя и допустимой мощности рассеяния. Поэтому особое значение приобретает требование к однородности исходного полупроводникового материала. Расширение функций, которые выполняются полупроводниковыми устройствами, вызвало потребность в новых полупроводниковых материалах. Совершенно естественно, что к исходному полупроводниковому материалу каждого прибора или устройства предъявляются требования, связанные с принципом действия и условиями работы этого прибора. Так, солнечные батареи должны длительное время работать в условиях космической радиации. По этой причине необходимым свойством исходного полупроводникового материала таких приборов является его радиационная стойкость. Полупроводниковый материал для лазера должен иметь прямые излучательные переходы электронов между энергетическими уровнями. Основные требования, предъявляемые к полупроводниковым материалам для таких полупроводниковых приборов, как термисторы, определяются необходимостью обеспечить широкий диапазон номинальных сопротивлений, различный температурный коэффициент сопротивления, малый разброс параметров и т.д.

Развитие полупроводниковой техники должно сопровождаться повышением надежности и снижением стоимости электронных схем. Естественный и понятный путь повышения надежности — это повышение общей культуры проектирования и производства приборов. Но необходим также глубокий анализ кинетических закономерностей и механизмов старения полупроводниковых материалов, которые используются при изготовлении полупроводниковых приборов. Снижение стоимости изделий полупроводниковой техники в сильной степени зависит от доли годных приборов, которая оказывается иногда очень низкой из-за плохого качества исходного полупроводникового материала и недостаточной однородности свойств кристаллов.

Интенсивно расширяется круг полупроводниковых материалов, различающихся не только природой химических связей, химическим и фазовым состояниями, но и структурным состоянием. Если

раньше это были монокристаллические полупроводниковые материалы, то позднее наряду с монокристаллами различной степени совершенства стали применяться поликристаллические материалы, а затем и аморфные. Вызванный вначале чисто экономическими соображениями (низкой стоимостью) интерес к аморфным полупроводникам все усиливается благодаря ряду их других достоинств.

15.3. КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Кристаллическую решетку полупроводников определяют три базисных вектора $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$, таких, что любая трансляция на вектор

$$\vec{R} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c},$$

представляющая собой линейную суперпозицию базисных векторов (m , n и p — целые числа), переводит кристаллическую решетку саму в себя. На рис. 15.1 показаны построенные на базисных векторах простейшие элементарные кристаллические ячейки. Большинство важнейших полупроводников имеют кристаллическую структуру типа алмаза или цинковой обманки, которые относятся к тетраэдрическим фазам, где каждый атом окружен четырьмя эквидистантными ближайшими соседями, расположенными в вершинах соответствующего тетраэдра. Связь между двумя ближайшими соседями обусловлена парой электронов с противоположными спинами. Решетки алмаза и цинковой обманки можно представить как две гранецентрированные кубические решетки, сдвинутые одна относительно другой на четверть объемной диагонали элементарной ячейки. В алмазоподобных полупроводниках (таких, как кремний) в узлах той и другой подрешетки находятся атомы кремния. В решетках типа цинковой обман-

ки (например, в арсениде галлия) одну подрешетку составляют атомы галлия, а другую — атомы мышьяка. Арсенид галлия является соединением типа $A^{III}B^V$, поскольку образован элементами III и V групп периодической системы Менделеева. Многие полупроводники кристаллизуются в решетку типа вюрцита либо каменной соли. Решетка вюрцита показана на рис. 15.2, а. Ее также можно представить как две вставленные одна в другую плотно упакованные гексагональные подрешетки (например, кадмия и серы в случае CdS). Как и в решетках типа цинковой обманки, в структуре вюрцита отдельный атом также находится в тетраэдрическом окружении четырех ближайших соседей. На рис. 15.2, б показана решетка каменной соли, которую можно рассматривать как две гранецентрированные кубические решетки, вставленные одна в другую. В этой структуре каждый атом окружен шестью ближайшими соседями.

Зонная структура полупроводников, т.е. связь энергии с волновым числом, обычно определяется из уравнения Шредингера в одноэлектронном приближении. Одной из наиболее важных теорем, на которой основана зонная теория, является теорема Блоха. Из теоремы Блоха следует, что энергия W является периодичной в пространстве обратной решетки, т.е. $W_{\vec{k}} = W_{\vec{k} + \vec{g}}$, где $\vec{k}$ — волновой вектор;

$$\vec{g} = h\vec{a}^* + k\vec{b}^* + l\vec{c}^* \quad (h, k, l - \text{целые числа});$$

$$\vec{a}^* = 2\pi \frac{\vec{b} \times \vec{c}}{\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}}; \quad \vec{b}^* = 2\pi \frac{\vec{c} \times \vec{a}}{\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}};$$

$$\vec{c}^* = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{\vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}} 2\pi.$$

Таким образом, для однозначного определения энергии достаточно использовать значения k в элементарной ячейке пространства обратной решетки. Такая ячейка называется зоной Бриллюэна.

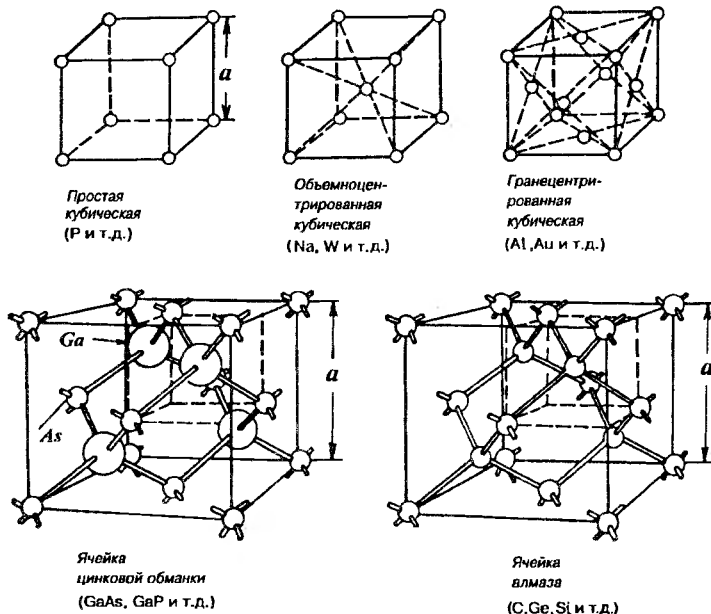


Рис. 15.1. Основные элементарные ячейки прямых решеток и кристаллическая структура ряда элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений (a — постоянная решетки)

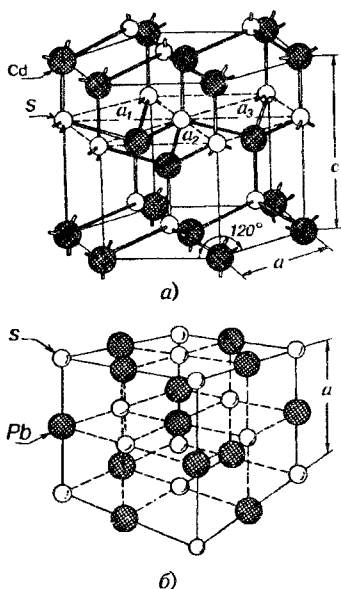


Рис. 15.2. Две элементарные ячейки решеток полупроводниковых соединений (a , c — постоянные решетки): a — ячейка решетки вюрцита CdS , ZnS и т.д.; b — ячейка решетки каменной соли (PbS , PbTe и т.д.)

Форма и размеры зон Бриллюэна определяются симметрией кристалла и его межатомными расстояниями. На рис. 15.3 показана зона Бриллюэна для решеток типа алмаза. Здесь же отмечены главные точки и линии симметрии. На рис. 15.4 представлена структура энергетических зон для Ge , Si и GaAs . В спектрах каждого из этих полупроводников имеется зона запрещенных энергий, в которой

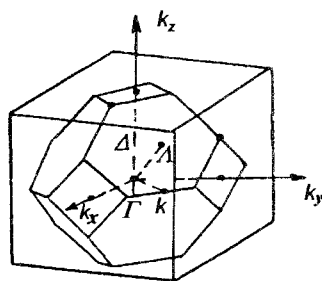


Рис. 15.3. Зоны Бриллюэна для решетки алмаза. Показаны главные точки и линии симметрии

не существует электронных состояний. Эти состояния образуют разрешенные зоны с энергиями выше и ниже этой энергетической щели. Верхнюю разрешенную энергетическую зону называют зоной проводимости, а нижнюю — валентной. Расстояние между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны называют шириной запрещенной зоны. Валентная зона в кристаллах со структурой цинковой обманки состоит из четырех подзон, если пренебречь спином в уравнении Шредингера, с учетом спина каждая зона дублируется. Три из четырех подзон вырождены при $k = 0$ (Γ — точка) и образуют верхний край зоны, а четвертая — дно зоны. Спин-орбитальное взаимодействие частично снимает вырождение при $k = 0$ и приводит к отщеплению одной подзоны. Как видно из рис. 15.4, две оставшиеся подзоны у потолка валентной зоны можно аппроксимировать параболическими зависимостями с различной кривизной. Зона проводимости также состоит из нескольких подзон (рис. 15.4). Дно зоны проводимости может быть расположено либо на осях $\langle 111 \rangle$ (Δ), либо на осях $\langle 100 \rangle$ (Δ), либо при $k = 0$ (Γ). Условия симметрии

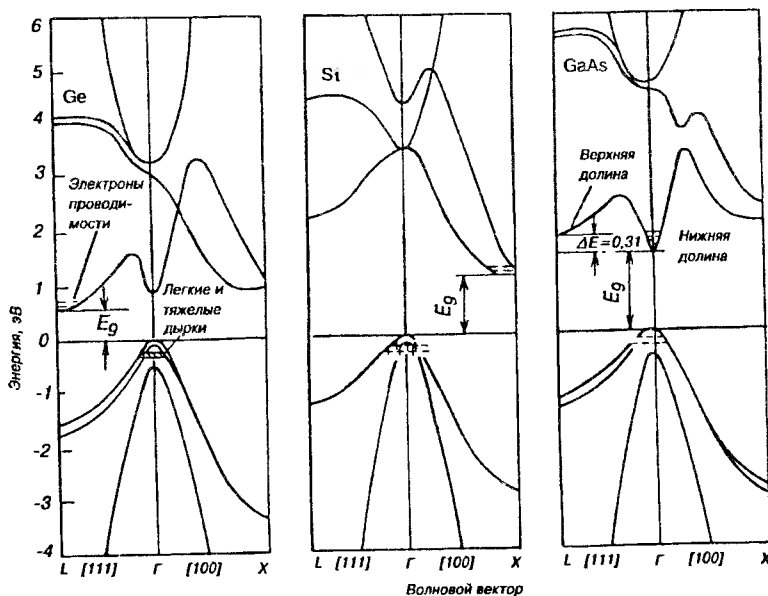


Рис. 15.4. Структура энергетических зон Ge , Si и GaAs (E_g — запрещенная зона)

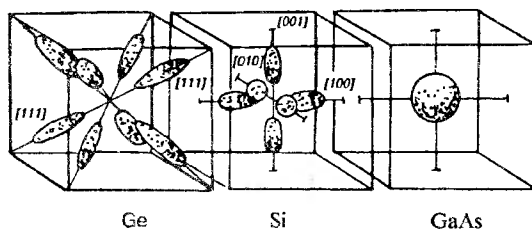


Рис. 15.5. Форма и расположение изоэнергетических поверхностей в Ge, Si и GaAs

не позволяют определить положение дна зоны проводимости. Экспериментальные результаты показывают, что у германия оно смещено в направлении осей $\langle 111 \rangle$, у кремния — в направлении осей $\langle 100 \rangle$, а у арсенида галлия лежит при $k = 0$. Форма поверхностей постоянной энергии показана на рис. 15.5. Для германия имеется восемь эллипсоидов, вытянутых вдоль осей $\langle 111 \rangle$, границы зоны Бриллюэна расположены в середине эллипсоидов. Для кремния имеется шесть эллипсоидов, вытянутых вдоль осей $\langle 100 \rangle$, центры эллипсоидов локализованы на расстоянии около трех четвертей от центра зоны Бриллюэна. Для арсенида галлия поверхностями постоянной энергии являются сферы с центром в середине зоны Бриллюэна.

15.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Элементарные полупроводники. К элементарным полупроводникам относятся вещества, расположенные в IV — VII подгруппах таблицы Менделеева — углерод (алмаз), кремний, германий, олово. Валентные оболочки свободных атомов этих элементов состоят из $(ns)^2 (np)^2$ электронов. Связи $s p^3$ — гибридные тетраэдрические с углом $109^\circ 28'$.

Кремний является вторым по распространенности элементом земной коры — его содержание в ней по массе составляет 27,6%. Из-за своей химической активности в свободном состоянии не встречается. Содержание германия в земной коре составляет $7 \cdot 10^{-4}\%$. При этом он является рассеянным в природе элементом и в виде рудных месторождений почти не встречается. В настоящее время одним из основных источников получения германия является каменный уголь, из которого германий извлекают как отход при сгорании.

Значение постоянной кристаллической решетки, свойства кремния и германия даны в табл. 15.1.

Олово обладает полиморфным превращением. Низкотемпературная полупроводниковая модификация (α -Sn) со структурой алмаза при нагреве переходит в высокотемпературную металлическую модификацию (β -Sn) со структурой тетрагональной решетки.

Кремний и германий являются самыми распространенными материалами полупроводниковой электроники и микроэлектроники. Из этих веществ, особенно кремния, изготавливают различные

электронные полупроводниковые приборы: диоды, транзисторы, тиристоры, фотоприемники, солнечные батареи, а также интегральные схемы — основу микроэлектронных и микропроцессорных устройств. Однако отсутствие прямых оптических переходов в кремнии и германии исключает возможность изготовления на их основе светодиодов и оптических квантовых генераторов.

Элементы V подгруппы — фосфор, мышьяк, сурьма и висмут. У этих элементов реализуются химические связи за счет образования p^3 -орбит, которые приводят к структурам с координационным числом $z_k = 3$, относящимся к ромбоэдрической сингонии.

Элементы V подгруппы находят широкое применение в полупроводниковой электронике, с одной стороны, в качестве донорных примесей в кремнии и германии, а с другой — как основные компоненты полупроводниковых соединений $A^{III} B^V$ и ряда других.

Элементы VI подгруппы — сера, селен, теллур. Химические связи этих элементов реализуются за счет образования p^2 -орбит, $z_k = 2$. Кристаллы этих элементов состоят из спиральных цепочек или колец, в которых каждый атом имеет ковалентные связи с атомами той же цепочки. Между собой цепочки связаны силами Ван-дер-Ваальса. Связи в этих кристаллах гораздо слабее, чем в кристаллах элементов IV и V подгрупп. В табл. 15.2 показано, как по мере возрастания атомного номера энергии связи в кристаллах уменьшаются, уменьшается ширина запрещенной зоны и увеличивается доля металлической составляющей связи.

Элементы VI подгруппы входят в качестве основных компонентов в многочисленные полупроводниковые соединения $A^{II} B^{VI}$, $A_2^{IV} B_3^{VI}$ и др. Кроме того, они используются в качестве донорных примесей в соединениях $A^{III} B^V$. Основные физические свойства элементов подгруппы представлены в табл. 15.3.

Элементом VII подгруппы, относящимся к полупроводникам, является йод. В твердом состоянии он обладает полупроводниковыми свойствами, в нем реализуются p -связи. Йод находит применение в качестве легирующей донорной примеси в полупроводниковых соединениях, а также входит в качестве компонента в состав соединений $A^{IV} B^{VII}$.

Полупроводниковые соединения. Наибольшее распространение получила классификация полупроводниковых соединений, основанная на объедине-

Т а б л и ц а 15.1

Физико-механические свойства кремния и германия

Свойство	Численное значение		Свойство	Численное значение	
	Кремний	Германий		Кремний	Германий
Атомный номер	14	32	Упругие постоянные, ГПа, при 298 К:		
Атомная масса	28,0855	72,60	C_{11}	166	129
Атомный объем, см ³ / (г-атом)	12,05	13,60	C_{12}	63,9	48,3
Число атомов в единице объема, см ⁻³	$5 \cdot 10^{22}$	$4,45 \cdot 10^{22}$	C_{13}	79,5	67,1
Постоянная решетки при 298 К	$0,543072 \pm 0,000001$	$0,565754 \pm 0,000001$	Коэффициенты пьезосопротивления для электронных образцов, ГПа ⁻¹ :		
Плотность, Мг/м ³ , при 298 + 0,01 К	2,32902	5,32674	Π_{44}	- 136	1380
Твердость по Моосу	—	5,25	$\Pi_{11} - \Pi_{12}$	- 1556	10
Температурный коэффициент длины $\alpha_l \cdot 10^6, K^{-1}$, при:			$\Pi_{11} + 2\Pi_{12}$	57	170
40 К	- 0,05	0,07	Коэффициенты пьезосопротивления для дырочных образцов, ГПа ⁻¹ :		
80 К	- 0,77	1,05	Π_{44}	1380	975
100 К	- 0,31	2,20	$\Pi_{11} - \Pi_{12}$	77	- 110
300 К	2,33	5,75	$\Pi_{11} + \Pi_{12}$	60	30
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при 298 К	109	58,3	Скорость распространения продольных звуковых волн, км/с, в направлении:		
Удельная теплоемкость, Дж/(моль·К), при:			[110]	9,15	—
80 К	5,20	11,1	[111]	—	5,40
300 К	19,5	22,8	Собственное удельное сопротивление, Ом·см, при 298 К	$2,3 \cdot 10^5$	68
Температура Дебая, К, измеренная при:			Концентрация свободных носителей заряда, см ⁻³ , при 298 К	$3 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$
80 К	539	353	Ширина запрещенной зоны, эВ при 298 К	1,12	0,75
300 К	680	406	Подвижность электронов в слаболегированном материале при 298 К, см ² /(В·с)	1450	3900
Скрытая теплота плавления, кДж/ моль	$45,5 \pm 0,8$	$33,7 \pm 0,8$	Подвижность дырок в слаболегированном материале при 298 К, см ² /(В·с)	500	1900
Скрытая теплота сублимации, кДж/моль, при:			Первый ионизационный потенциал, В	8,14	8,10
1550 К	440 ± 50	—	Магнитная восприимчивость	$-0,13 \cdot 10^{-4}$	$-0,12 \cdot 10^{-6}$
1150 К	—	371 ± 8	Относительная диэлектрическая проницаемость	12,5	16,0
Температура плавления, °С	1417	936			
Уменьшение объема при плавлении, %	9,0	5,5			
Коэффициент поверхностного натяжения (при температуре плавления), Н/м	0,72	0,60			
Температура кипения, °С	2600	2700			

Т а б л и ц а 15.2
Некоторые свойства элементарных
полупроводников, расположенных в V и VII
подгруппах [15.2]

Элемент	Z	Кратчайшее межатомное расстояние, нм	$T_{пл}$, К	ΔW , эВ, при 300 К
Подгруппа V				
Фосфор	15	0,34	—	1,5
Мышьяк	33	0,25	1090**	1,2
Сурьма	51	0,29	903	0,11
Висмут*	83	0,31	544	0
Подгруппа VII				
Сера	16	—	392	2,4
Селен	34	0,23	493	1,6
Теллур	52	0,29	725***	0,3

* Висмут — полуметалл.

** При давлении примерно $3,6 \cdot 10^6$ Па.

*** Для кристаллического серого теллура.

нии в один класс материалов, имеющих одинаковую стехиометрическую формулу и образованных из элементов, расположенных в одних группах периодической системы элементов.

Химические связи в полупроводниковых соединениях смешанные, с преобладанием ковалентной

составляющей. Как и у элементарных полупроводников, обобщенной качественной характеристикой химической связи в одном классе соединений является средний атомный номер соединения

$$Z_{cp} = \sum C_i Z_i / \sum C_i,$$

где C_i — число атомов i -го компонента; Z_i — порядковый номер i -го компонента.

В пределах классов соединений существует корреляция между свойствами соединений и их средним атомным номером.

Двойные полупроводниковые соединения образуются при возникновении в основном гибридных орбит sp , sp^2 , dsp^2 , d^2sp и др. На рис. 15.6 показаны пространственные конфигурации различных связей, встречающихся в двойных полупроводниковых соединениях.

Химические связи и структуры кристаллической и обратной решеток определяют строение валентной зоны и зоны проводимости соединений типа $A^{III}B^V$.

В табл. 15.4—15.7 представлены некоторые свойства бинарных соединений.

Полупроводниковые соединения используют для создания приборов и устройств различного назначения (табл. 15.8). Широкий спектр применения полупроводниковых соединений обусловлен удачным сочетанием комплекса физико-химических и электрофизических свойств данных материалов.

Т а б л и ц а 15.3

Физические свойства селена и теллура

Параметр	Se (модификация)		Te
	Стекловидный	Гексагональный	
Атомная масса	78,96	78,96	127,6
Валентность	6; 4; -2	6; 4; -2	6; 4; -2
Атомный радиус, нм	0,117	0,117	0,17
Постоянная решетки, нм:			
a	—	0,436	0,449
b	—	0,436	0,374
c	—	0,496	0,591
Плотность, $Mг/м^3$	4,28	4,80	6,25
Температура плавления, °С	—	219 ± 1	452
Температура кипения, °С	685 ± 4	685 ± 4	990
Модуль упругости при растяжении $\times 10^{-10}$, Па	—	5,80	15,5
Температурный коэффициент линейного растяжения, $\alpha_l, 10^{-6} K^{-1}$	51	- 18 ($\parallel$ оси c) + 47 ($\perp$ оси c)	- 1,6 ($\parallel$ оси c) + 27 ($\perp$ оси c)
Удельная теплоемкость Дж/(кг · К)	400	325	202
Удельная теплота плавления, Дж/кг	—	8400	140
Удельная теплота испарения, 10^6 Дж/кг	—	1,2	390
Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · К)	1,3	3,0	1,0 — 6,2
Удельная проводимость, $Om^{-1} \cdot cm^{-1}$	$10^{-15} — 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-5} \div$ $\div 1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,0 — 3,2 \cdot 10^2$
Температурный коэффициент удельного сопротивления, K^{-1}	—	- 0,02	—
Коэффициент термоЭДС, мкВ/К	—	+ 880	120 — 450
Концентрация дырок, cm^{-3}	—	$5 \cdot 10^{16}$	—
Подвижность, $cm^2/(B \cdot c)$	—	$2 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^2$
Ширина запрещенной зоны, эВ	2,0	1,8	0,38
Показатель преломления в области длин волн 1,5 — 10 мкм	2,43	2,49	4,90—4,85
Показатели поглощения в области длин волн 1,5 — 10 мкм, m^{-1}	300	2000	1200

Т а б л и ц а 15.4
Электрические параметры и свойства соединений $A^{III}B^V$

Соединение $A^{III}B^V$	Ширина запрещенной зоны ΔE , эВ		Температурное изменение запрещенной зоны, 10^{-4} эВ/К	Приведенная эффективная масса m^*/m_0		Эффективный заряд $q_{эф}$	Диэлектрическая проницаемость		Энергетиче- ский переход	Подвижность μ , $cm^2/(V \cdot s)$	
	0 К	300 К		электронов m_n^*/m_0	дырок m_p^*/m_0		низкочастот- ная, ϵ_0	высокочастот- ная, ϵ_∞		электронов μ_n	дырок μ_p
BnK	—	8,0	—	—	—	—	—	—	Непрямой	—	—
BnI	—	3,85	—	—	—	0,43	4,15	3,25	—	—	—
AlN	6,2	5,88	—	—	—	0,56	8,5	5,44	—	80	—
GaN	3,50	3,39	-4,8	0,19	0,6 (т)	0,55	12,3	5,2	Прямой	440	3,0
InN	2,2	1,95	-8,3	—	—	0,58	5,5	—	—	35-50	—
BP	2,2	2,0	-4,5	—	—	0,20	—	—	—	—	500
AlP	2,52	2,45	-3,5	0,13	—	0,46	9,8	—	Непрямой	80	30
GaP	2,34	2,2	-4,7	0,35	0,17 (л) 0,8 (т)	0,45	10	—	—	190/2700	120/2000
InP	1,42	1,35	-2,8	0,077	0,078 (т)	0,49	12,1	—	Прямой	4600/23 000	150/1200
Bas	—	1,46	—	1,2	0,4 (т)	—	—	—	—	—	—
AlAs	2,24	2,16	-4,0	0,5	0,26 (л) 0,31 (т) 0,22 (л) 0,49 (т)	0,47	10,9	—	Непрямой	280	—
GaAs	1,52	1,43	-4,0	0,068	0,082 (л) 0,45 (т)	0,46	13,8	10,4	Прямой	9500 $2 \cdot 10^5$	450 4200
InAs	0,425	0,356	-3,5	0,023	0,025 (т) 0,41 (т)	0,49	14,55	—	—	33000 $1,2 \cdot 10^5$	460 690
AlSb	1,70	1,62	-3,5	0,39	0,11 (л) 0,50 (т)	0,44	11,21	—	Непрямой	200 700	550 3700
GaSb	0,813	0,70	-3,6	0,048	0,052 (л) 0,33 (т)	0,43	15,69	—	То же	4000	1400
InSb	0,236	0,18	-3,0	0,0135	0,016 (л) 0,438 (т)	0,46	17,72	—	Прямой	78 000	750
						—	—	15,68		—	—

П р и м е ч а н и я: 1. Символы в скобках означают: л — «легкие дырки», т — «тяжелые дырки», — — «тяжелые дырки». 2. Для подвижности в числителе указаны значения при 300 К, в знаменателе — при 77 К.

Т а б л и ц а 15.5

Физические свойства сульфидов, селенидов и теллуридов цинка, кадмия, ртути [15.1]

Свойство	ZnS	ZnSe	ZnTe	CdS	CdSe	CdTe	HgS	HgSe	HgTe
Молекулярная масса	97,45	144,34	192,99	144,48	191,37	240,02	232,68	279,57	328,22
Постоянные кристаллические решетки, нм: кубической (К) при постоянной решетке a ; гексагональной (Г) при постоянной решетке: a c	0,5415 0,3820 0,6257	0,567 0,400 0,654	0,609 0,427 0,699	0,583 0,415 0,674	0,605 0,430 0,701	0,648 0,460 0,751	0,585 0,415 0,950	0,607 — —	0,646 — —
Плотность, Мг/м ³	4,15	5,42; 5,23	5,68	4,82	5,68	5,86	8,10; 7,70	8,26	8,42
Температура, К: плавления кипения	1900 2200	1790 2000	1512 1700	1970 1250	1510 1600	1360 1400	1300 850	1072	940
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	485	330	245	335	260	205	212	175	150
Температурный коэффициент длины α_l , $10^{-6} \cdot K^{-1}$	6,5	7,7	8,3	5,4	—	4,2	21,5	—	4,8
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	16	13—19	15—20	16—20	4,5	6,5	—	2,0	1,5—3
Ширина запрещенной зоны, эВ	3,6—3,7	2,7—2,8	2,1—2,3	2,4—2,6	1,6—1,8	1,3—1,6	2,0	0,2—0,6	0,2—0,01
Изменение ширины запрещенной зоны при изменении температуры, эВ/К	— 5,3	— 7,2	—	— 4,9	— 4,6	— 4,1	—	—	+ 5,0
Температура Дебая, К	310	400	250	250—300	230	160—200	—	200—240	140
Приведенная эффективная масса: электронов дырок	0,25 0,5—1,0	0,16 0,6	0,2 0,1—0,3	0,1—0,3 0,4—0,5	0,13 0,45	0,14 0,35	—	0,04—0,06 0,02—0,08	0,017 0,003
Подвижность, см ² /(В·с): электронов дырок	165 5	700 15	340 100	350 50	800 50	1000 60	50—200	10 000—18 000	10 000—30 000 100
Диэлектрическая проницаемость	8—8,5	8,1—9,1	10,0	9,0	9,5—10,5	9,6—11	31,0	26,0	20—48
Показатель преломления	2,23	2,43	3,12	2,26	2,44	2,67	2,63	—	3,80

Т а б л и ц а 15.6

Физические и электрические свойства бинарных соединений $A^{IV}B^{VI}$ [15.2]

Свойство	GeS	GeSe	GeTe	SnS	SnSe	SnTe	PbS	PbSe	PbTe
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,80	1,16	0,10	1,08	0,90	0,18	0,41	0,29	0,32
Подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	—	—	—	—	—	—	610	1045	1730
Подвижность дырок, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	—	70	50—150	90	115	50—400	620	1000	840
Показатель преломления	—	—	—	—	4,6*	—	4,1**	4,59**	5,35
Статическая диэлектрическая проницаемость	—	—	40	—	—	1770	175	250	400
Оптическая диэлектрическая проницаемость	—	—	37	19	—	45	17	24	33
Температура Дебая, К	—	—	165	270*	210*	140	227**	138**	125*
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{К} \cdot \text{м})$	112	122	336	—	—	384	144	94	115
Плотность, $\text{Мг}/\text{м}^2$	4,012	5,520	6,190	5,080	6,179	6,450	7,607	8,150	6,160

* $\lambda = 2,5$ мкм; $T = 80$ К.** $\lambda = 3,0$ мкм; $T = 200$ К.

Т а б л и ц а 15.7

Свойства соединений $A^I B^{VI}$ [15.2]

Соединение	$Z_{\text{ср}}$	Элементарный аналог	Двойной аналог		Период решетки, мм	$T_{\text{пл}}$, К
			$A^{III}B^V$	$A^{II}B^{VI}$		
CuCl	23	Ge + Si	GaP	ZnS	$a = 0,5416$ $a = 0,391$ $c = 0,642$	695
CuBr	32	Ge	InP, GaAs, AlSb	MgTe, ZnSe, CdS	$a = 0,6990$ $a = 0,406$ $c = 0,66$	777
CuI	41	Ge + α -Sn	InAs, GaSb	ZnTe, CdSe	$a = 0,6052$ $a = 0,431$ $c = 0,707$	878
AgI	50	α -Sn	InSb	CdTe	$a = 0,6502$ $a = 0,459$ $c = 0,751$	625

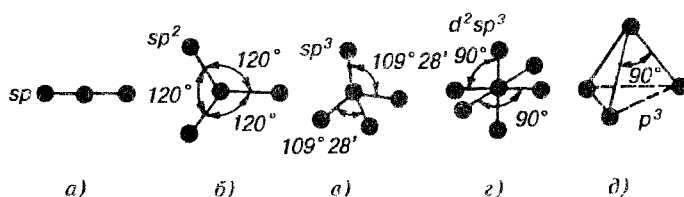


Рис. 15.6. Пространственные конфигурации эквивалентных связей, осуществляемых гибридными орбитами sp (a), sp^2 (б), sp^3 (в), d^2sp^3 (г) и p -валентными орбитами (д):

a — диагональная линейная конфигурация, $Z_k = 2$; б — тригональная плоская, $Z_k = 3$; в — тетраэдрическая, $Z_k = 4$; г — октаэдрическая, $Z_k = 6$; д — тригонально-пирамидальная, $Z_k = 3$

Т а б л и ц а 15.8

Материал	Ширина запрещенной зоны при 298 К, эВ	Рабочие температуры, °С	Основные области применения
Германий Ge	0,72	- 60 ÷ 70	Выпрямительные плоскостные диоды; сплавные биполярные транзисторы; точечные ВЧ; импульсные, СВЧ и ЛПД-диоды; туннельные диоды; оптические линзы и фильтры; датчики Холла; фоторезисторы и фотодиоды; модуляторы света и т.д.
Кремний Si	1,12	- 60 ÷ 200	Планарные транзисторы; ИМС*; выпрямительные, импульсные и СВЧ-диоды; стабилитроны; тиристоры; солнечные элементы; датчики Холла; тензодатчики; полевые транзисторы; фоточувствительные приборы (длины волн 0,3—1,1 мкм)
Арсенид галлия GaAs	1,43	- 60 ÷ 200	Светодиоды ИК-диапазона; лазеры; фотоприемники; генераторы СВЧ-колебаний; туннельные диоды; датчики Холла и т.д.
Фосфид галлия GaP	2,2	- 60 ÷ 200	Светодиоды видимого диапазона; фотоприемники и т.д.
Карбид кремния: основные политипы		- 60 ÷ 400	Высокотемпературные силовые полупроводниковые приборы
3C - SiC	2,31		Полевые транзисторы; СВЧ-приборы; туннельные диоды; светодиоды; фотодиоды; терморезисторы; фоторезисторы и т.д.
15 - SiC	2,9		
6H - SiC	2,98		
4H - SiC	3,09		
Селен Se:			Выпрямительные диоды; варисторы; фоточувствительные
гексагональный	2,0	- 60 ÷ 100	слои для электрофотографии; фильтры и линзы в ИК-области; преобразователи ИК-изображения в видимое и т.д.
стеклоподобный	1,8	- 60 ÷ 60	
Сульфид кадмия CdS	2,4 — 2,6	- 60 ÷ 60	Фоторезисторы; люминофоры; усилители света; твердотельные преобразователи изображения и т.д.
Селенид кадмия CdSe	1,6	- 60 ÷ 60	Фоторезисторы; оптический материал прозрачный в ИК-области и т.д.

*ИМС — интегральные микросхемы.

15.5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Концентрация носителей, подвижность и удельное сопротивление. Концентрация носителей заряда в полупроводниках обычно на 5—7 порядков меньше, чем в металлах, и примерно на столько же больше, чем в диэлектриках. Следовательно, именно ее значение определяет принадлежность материала к классу полупроводников. Собственная концентрация n_i является фундаментальным параметром и рассчитывается исходя из эффективных масс электронов и дырок, ширины запрещенной зоны и температуры по уравнению

$$n_i = p_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right),$$

где N_c и N_v — множители, мало зависящие от температуры, в которые входят эффективные массы электронов и дырок; k — постоянная Больцмана.

Собственная концентрация тем ниже, чем больше ширина запрещенной зоны. Так, для германия она составляет $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, с учетом высокой технологичности этого полупроводника удастся концентрацию примесей опустить ниже собственной концентрации носителей заряда — до $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$, отчего концентрация носителей, конечно, не снижается. Получить собственный кремний ($n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$) — задача значительно более трудная, а арсенид галлия — вообще современными средствами неразрешимая.

Измерение концентрации носителей заряда ча-

ще всего выполняется по методу Холла, а также вольт-фарadayным методом. Последний метод, называемый также $C-U$ -методом, основан на измерении емкости барьера металл-полупроводник, связанной с концентрацией носителей заряда уравнением

$$C = S \left(\frac{\epsilon \epsilon_0 q n}{2U} \right)^{1/2},$$

где $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — электрическая постоянная; ϵ — диэлектрическая проницаемость; S — площадь контакта; q — заряд электрона; U — напряжение.

Контакт к полупроводнику можно создать с помощью капли ртути, поэтому измерение может выполняться экспрессно. Погрешность измерения этим методом не хуже $\pm 10\%$.

Сущность метода Холла состоит в том, что если поместить однородный прямоугольный образец полупроводника в магнитное поле, то на боковых гранях A и B полупроводника возникает поперечная разность потенциалов, называемая ЭДС Холла (рис. 15.7),

$$U_a - U_b = RIB/d$$

или

$$U_a - U_b = \rho \mu IB/d,$$

отсюда определяется коэффициент Холла

$$R = \frac{(U_a - U_b) d}{IB},$$

где $U_a - U_b$ — ЭДС Холла; I — ток через образец;

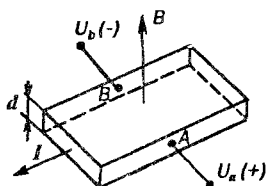


Рис. 15.7. Поперечное поле, обусловленное эффектом Холла

B — магнитная индукция; d — толщина пластинки в направлении магнитного поля.

В общем виде коэффициент Холла определяется выражением

$$R = \frac{1}{q} \frac{-n\mu_n^2 + p\mu_p^2}{(n\mu_n + p\mu_p)^2} = \frac{-nb + p}{(nb + p)^2 q},$$

где $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ — отношение подвижностей носителей заряда; n — концентрация носителей заряда.

Метод Холла позволяет определить тип проводимости полупроводника, концентрацию и подвижность носителей заряда.

Проводимость полупроводников, как и других материалов, зависит от концентрации свободных носителей заряда (электронов и дырок) при данной температуре и их подвижности. В общем случае

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p),$$

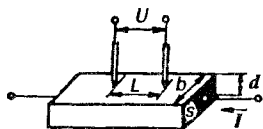
где σ — удельная проводимость при данной температуре; ρ — удельное сопротивление.

В настоящее время имеется много методов измерения удельного сопротивления полупроводника: двухзондовый, трехзондовый, четырехзондовый, бесконтактный и др. Наибольшее распространение получили двухзондовый и четырехзондовые методы.

Двухзондовый метод применяется для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму с известным поперечным сечением (рис. 15.8). Через торцевые границы образца с нанесенными на них омическими контактами пропускается электрический ток. На поверхности образца вдоль силовых линий тока располагаются два металлических зонда на расстоянии L один от другого и измеряется разность потенциалов U между ними. Удельное сопротивление образцов вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{US}{IL} = \frac{Udb}{IL}.$$

Для исключения падения напряжения на кон-



15.8. Измерение удельного сопротивления двухзондовым методом

тактных сопротивлениях зондов разность потенциалов U измеряется потенциометром или вольтметром с большим входным сопротивлением.

Четырехзондовый метод, обладающий высокими метрологическими показателями и простотой, используется чаще. Он позволяет измерять удельное сопротивление не только объемных монокристаллов, но и тонких диффузионных и эпитаксиальных слоев полупроводника. Принцип четырехзондового метода показан на рис. 15.9. На поверхности полупроводника помещаются четыре зонда, расположенные на одной линии на равном расстоянии L один от другого. Через крайние зонды пропускается электрический ток I , а между двумя внутренними зондами изменяется разность потенциалов U .

Для полубесконечного образца, когда $d, L, h \gg L$, удельное сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = 2\pi LU/I.$$

При измерении образцов полупроводника с размерами d, L, h , соизмеримыми с межзондовым расстоянием L , вводится поправочный множитель F , который зависит от граничных условий измерения.

Для характеристики относительной чистоты полупроводникового материала вводится коэффициент K , характеризующий степень компенсации и равный для полупроводника n -типа

$$K = N_a/N_d,$$

где N_a, N_d — концентрации акцепторных и донорных примесей, которые могут быть определены из температурных зависимостей концентрации и подвижности свободных носителей заряда по эффекту Холла (рис. 15.10—15.15). Используя закон действующих масс, можно определить концентрацию основных носителей в примесном полупроводнике:

для электронного полупроводника

$$\frac{n(N_a + n)}{N_d - N_a - n} = \frac{1}{\gamma_d} 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \frac{W_d}{kT} = K_d,$$

для дырочного полупроводника

$$\frac{p(N_d + p)}{N_a - N_d - p} = \frac{1}{\gamma_a} 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \frac{W_a}{kT} = K_a,$$

где h — постоянная Планка; γ_d, γ_a — факторы вырождения донорного и акцепторного уровней; W_d, W_a — энергия активации донорной и акцепторной примесей.

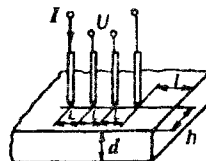


Рис. 15.9. Измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом

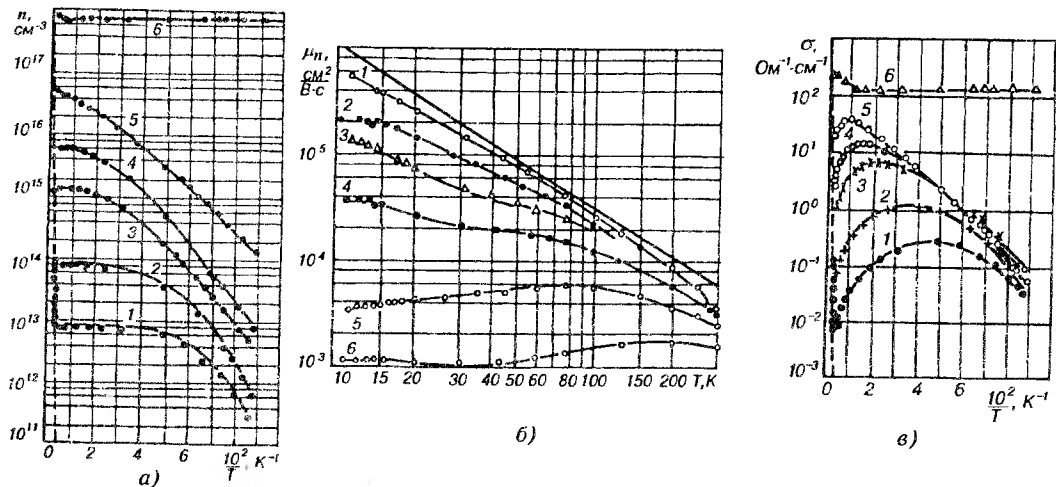


Рис. 15.10. Температурные зависимости для германия: концентрации электронов (а), подвижности (б), удельной проводимости (в) при разной концентрации мышьяка:

1 — 8×10^{-3} см $^{-3}$; 2 — 8×10^{-4} см $^{-3}$; 3 — $1,2 \times 10^{-3}$ см $^{-3}$; 4 — 7×10^{-3} см $^{-3}$; 5 — 8×10^{-3} см $^{-3}$; 6 — 8×10^{-3} см $^{-3}$

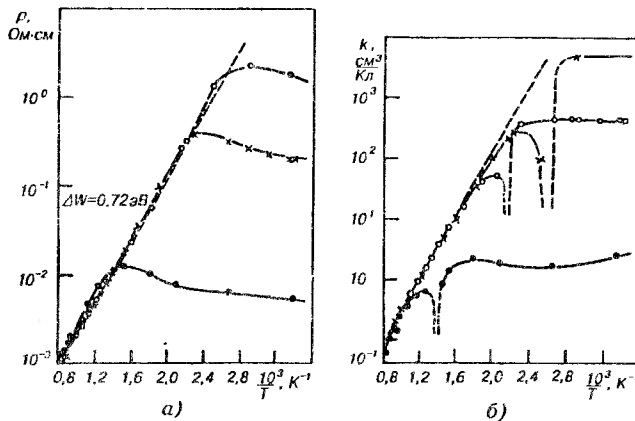


Рис. 15.11. Температурные зависимости для германия р-типа удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б)

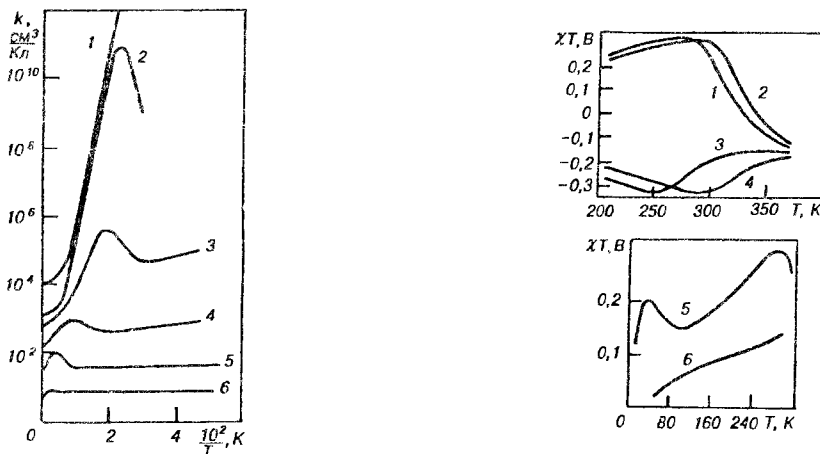


Рис. 15.12. Температурные зависимости коэффициента Холла для германия n-типа с разной концентрацией сурьмы: 1 — $5,3 \times 10^{14}$ см $^{-3}$; 2 — 3×10^{15} см $^{-3}$; 3 — $2,4 \times 10^{16}$ см $^{-3}$; 4 — $6,4 \times 10^{16}$ см $^{-3}$; 5 — $1,3 \times 10^{17}$ см $^{-3}$; 6 — $9,5 \times 10^{17}$ см $^{-3}$

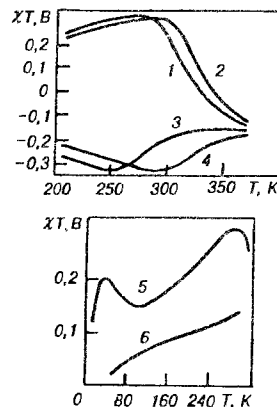


Рис. 15.13. Температурные зависимости произведения термоЭДС на температуру германия с различной концентрацией акцепторов и доноров: 1 — $N_a = 8 \times 10^{12}$ см $^{-3}$; 2 — $N_a = 1,6 \times 10^{14}$ см $^{-3}$; 3 — $N_d = 8 \times 10^{12}$ см $^{-3}$; 4 — $N_d = 8,9 \times 10^{12}$ см $^{-3}$; 5 — $N_a = 1,9 \times 10^{14}$ см $^{-3}$; 6 — $N_a = 6 \times 10^{17}$ см $^{-3}$

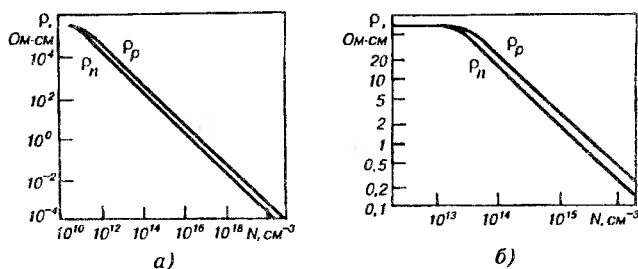


Рис. 15.14. Зависимости удельного сопротивления от концентрации акцепторных ρ и донорных n примесей при температуре 298 К для кремния (а) и германия (б)

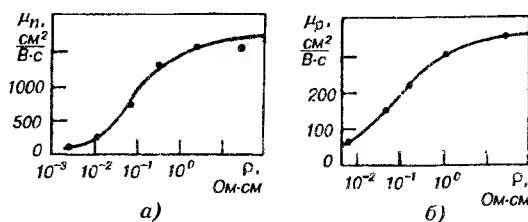


Рис. 15.15. Зависимость холловской подвижности основных носителей заряда от удельного сопротивления кремния при 300 К для электронного (а) и дырочного (б) образцов

Анализируя температурную зависимость концентрации в области собственной проводимости, можно определить ширину запрещенной зоны.

Время жизни неосновных носителей заряда. При расчете и конструировании полупроводниковых приборов и интегральных схем используется параметр время жизни неосновных носителей заряда, который можно определить для электронов в полупроводнике p -типа

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t},$$

а для дырок в n -полупроводнике

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t},$$

где σ_n, σ_p — сечение захвата электрона и дырки; v_{th} — тепловая скорость носителей, равная $\sqrt{\frac{3kT}{m^*}}$; N_t — концентрация ловушек; m^* — эффективная масса носителя, характеризующая его движение в кристаллической решетке. Время жизни связано с диффузионной длиной

$$L_{np} = \sqrt{D \tau},$$

где D — коэффициент диффузии, определяемый из соотношения Эйнштейна $\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$.

Наиболее распространенный метод измерения времени жизни связан с изменением фотопроводимости кристалла во время прекращения действия света на полупроводник соотношением

$$\sigma_{\phi} = \sigma_0 \exp(-t/\tau),$$

где σ_{ϕ} — фотопроводимость полупроводника; σ_0 — проводимость полупроводника в темноте; t — время.

15.6. АМОРФНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Общие сведения. Аморфные полупроводники — это вещества, обладающие в твердом аморфном состоянии свойствами полупроводников. Под аморфным твердым телом принято понимать такое тело, в котором отсутствует трехмерная периодичность в расположении атомов. Благодаря такому определению термины «неупорядоченный», «некристаллический», «аморфный», «стеклообразный» являются синонимами.

Материал считается аморфным, если на его электронограммах и рентгенограммах наблюдаются диффузные кольца, а не резкие брегговские кольца или отдельные пятна, характерные для поликристаллических или монокристаллических твердых тел.

Некристаллические материалы, получаемые охлаждением расплава, называются *стеклами*. Большинство стекол являются широкозонными полупроводниками, в которых ширина запрещенной зоны превосходит 1 эВ. Примерами могут служить селен Se, триселенид мышьяка As_2Se_3 и сходные с ними халькогенидные полупроводники и многокомпонентные системы, а также боросиликатные стекла.

Такие вещества, как теллур Te, германий Ge, кремний Si, бор B и антимонид индия InSb, которые нельзя получить обычной закалкой расплава, могут быть получены в аморфном состоянии путем напыления. Ширина запрещенной зоны в них обычно меньше, чем в стабильных стеклах.

Из существующих в настоящее время классификаций некристаллических полупроводников наиболее распространенной является классификация, основанная на сопоставлении структурных особенностей материалов в пределах ближнего порядка.

Т а б л и ц а 15.9

Классификация некристаллических полупроводников в соответствии со структурой ближнего порядка в расположении атомов [15.6]

Число ближайших соседей	Тип (группа в периодической таблице)	Примеры
2	A^{VI}	Sc, Te
3	A^V	As, Sb, P
3 и 4	A^{IV}	C
4	A^{IV}	Ge, Si
4	$A^{IV} - B^{IV}$	SiC
4	$A^{III} - B^V$	Ga P
4	$A^{III} - B^{VI}$	In Te
4	$A^{III} - B^{IV} - C^V$	Cd Sn _x As _y
6	A^{III}	B
3 — 2	$A^V - B^{VI}$	Bi ₂ Se ₃
4 — 2	$A^{IV} - B^{VI}$	SiO ₂

Схема классификации, в основе которой лежит координационное число, для ряда материалов показана в табл. 15.9. С учетом такой классификации можно выделить две группы, состоящие из ионных и ковалентных материалов. Ионные материалы основаны на стеклообразующих оксидах типа O_2 , P_2O_5 и B_2O_5 .

Ковалентные аморфные полупроводники в дальнейшем делятся еще на два класса. К первому классу относятся материалы с тетраэдрической направленностью связей, такие как элементы Si, Ge и соединения $A^{III} B^V$. Эти материалы могут быть приготовлены в аморфной фазе лишь вакуумным напылением тонких пленок. Второй класс состоит из халькогенидных стекол на основе элементов S, Se и Te, к которым могут добавляться другие элементы, такие как Si, Ge и As.

На рис 15.16 показано, какие из элементов

периодической системы известны к настоящему времени в стеклообразном или аморфном состоянии.

Практическое использование некристаллических полупроводников определяется особенностями их структуры, свойств, химической стойкостью и механической прочностью, а также технологичностью их обработки и возможностью получения материалов с заданными свойствами. Некоторые устройства регистрации оптических изображений удалось создать только благодаря использованию некристаллических полупроводников. К таким устройствам относятся, например, телевизионные трубки типа «видикон», электрофотографические приборы и регистрирующие среды типа «халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) — термопластик».

Полупроводниковые материалы, используемые для указанных целей, должны обладать одновременно высоким удельным темновым сопротивлением ($\rho_T > 10^{11}$ Ом · см) и высокой фоточувствительностью (изменять свое удельное сопротивление при освещении на несколько порядков). Указанные требования противоречивы и могут быть удовлетворены одновременно лишь при низких значениях подвижности носителей заряда, что характерно для аморфных полупроводников.

При создании элементов оптической и электрической памяти и приборов на основе аморфных полупроводников используются также такие их свойства, как фотостимулированное изменение оптического поглощения и коэффициента преломления, фотокристаллизация и высокая радиационная стойкость (например, термисторы на основе ХСП в управляющих схемах ядерных реакторов не претерпевают заметных изменений проводимости даже при дозах облучения 10^{20} нейтрон/см²).

С использованием слоев гидрогенизированного аморфного кремния, полученных разложением силанов в тлеющем разряде, путем последовательных

		▲ 1 ■ 2 ● 3 × 4 p 5 * 6															
Li	Be																
Na	Mg																
K	Ca	Sc	Ti	V*	Cr*	Mn	Fe*	Co	Ni*	Cu	Zn	Ga*	Ge*	As*	Se*	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr*	Nb*	Mo*	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te*	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf*	Ta*	W*	Re*	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi*	Po	At	Rn

Рис. 15.16. Элементы периодической системы, которые можно получить в аморфном или стеклообразном состоянии:

1 — испарение и конденсация на охлаждаемых подложках; 2 — химическое осаждение; 3 — осаждение при очень большой скорости охлаждения; 4 — электролитическое осаждение; 5 — плазменное испарение; 6 — в чистом виде

добавок таких газов, как фосфин PH_3 и диборан B_2H_6 , можно получить p - n -переход. Преимущество слоев на основе аморфного кремния состоит в возможности осуществления непрерывного технологического производства, например, солнечных элементов большой площади, существенно более дешевых, чем монокристаллические фотопреобразователи (рис. 15.17).

Халькогенидные стеклообразные полупроводники. Синтез стеклообразных полупроводников проводится в вакуумированных ($10^{-3} - 10^{-4}$ мм рт.ст.) кварцевых ампулах из элементарных материалов. Режимы синтеза самые разнообразные и зависят от температуры плавления компонентов стекла, упругости их паров и т.д. Так, стеклообразные сплавы систем $\text{As}-\text{Se}$, $\text{As}-\text{S}$, $\text{As}-\text{Se}-\text{S}$, $\text{As}-\text{S}-\text{Te}$, $\text{As}-\text{Se}-\text{Te}$ синтезируются при температуре 700°C . При этой температуре сплавы выдерживаются в печи 4—6 ч. Для лучшей гомогенизации расплавов применяется вибрационное перемешивание.

Все сплавы, содержащие Ge, температура плавления которого 936°C , синтезируются при $900-950^\circ\text{C}$. У сплавов, содержащих кремний, температура синтеза повышается до 1150°C . Дальнейшее повышение температуры сплавов с участием кремния лимитируется температурой размягчения кварцевых ампул.

В зависимости от состава сплава и его кристалли-

зационной способности применяются различные режимы охлаждения расплавов. Например, для получения стекол на основе мышьяка и теллура применяют метод очень быстрого охлаждения расплава при выливании его на специально приготовленную охлаждаемую поверхность. В противоположность указанным материалам кристаллизация стабильного стекла As_2Se_3 происходит так медленно, что позволяет получить стекло при очень низкой скорости охлаждения расплава. В табл. 15.10 приведены значения минимальных скоростей охлаждения $v_{\min}$ при изготовлении полупроводниковых стекол.

Аморфные формы кремния и германия. Аморфные кремний и германий получают путем их испарения и конденсации в глубоком вакууме или катодного распыления в аргоновой плазме. Для получения аморфного гидрогенизированного кремния ($a-\text{Si:H}$) широко используется метод разложения моносилана SiH_4 в плазме тлеющего разряда. Большое распространение в последнее время получили: метод химического осаждения из паровой фазы (CVD-технология), магнетронное распыление кремниевой мишени, электронное испарение в присутствии атомарного потока водорода. Метод высокочастотного ионно-плазменного распыления кремниевой мишени в атмосфере аргоново-водородной смеси универсален, прост и в то же

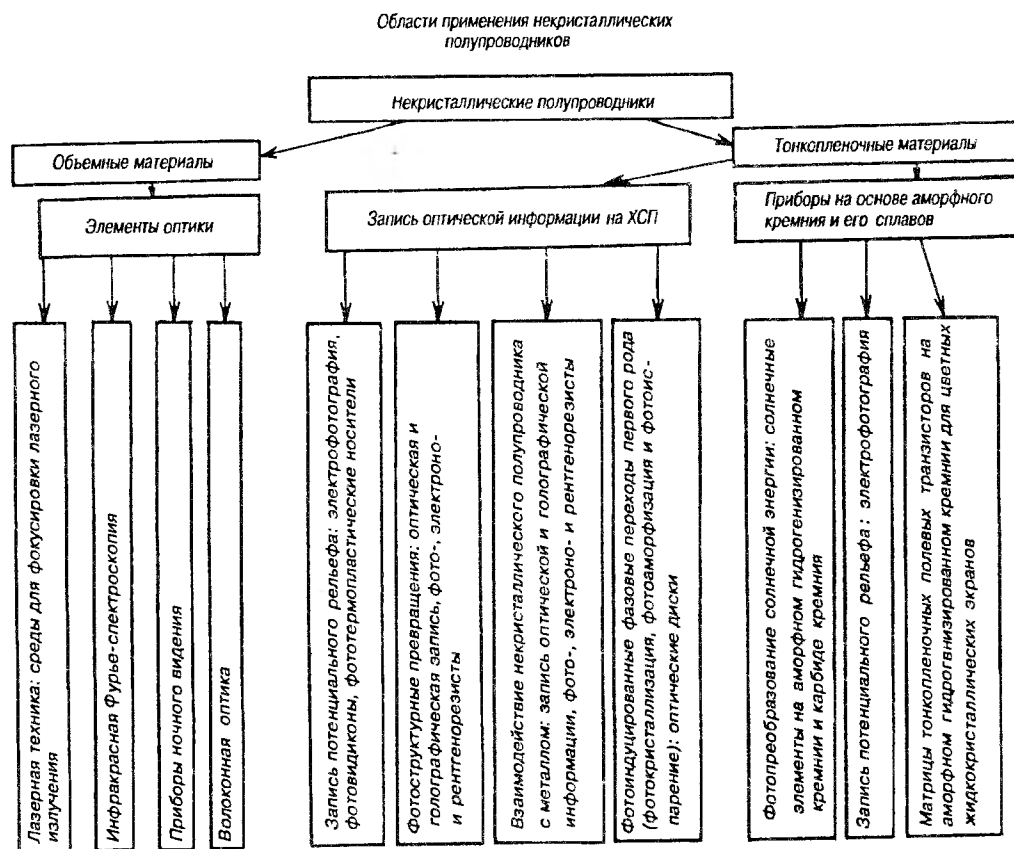


Рис. 15.17. Некоторые виды применения некристаллических полупроводников

Т а б л и ц а 15.10
Значения критической скорости охлаждения
[15.14]

Вещество	Температура плавления, К	$\lg(v_{min}, \text{К/с})$
S	393	0,5
Se	494	2,0
Te	723	2,9
P (белый)	317	0,7
P (красный)	866	2,9
As ₂ S ₃	598	0,8
As ₂ Se ₃	643	1,5
As ₂ Te ₃	663	1,9
SiO ₂	1883	2,3
B ₂ O ₃	723	2,1

время позволяет получать пленки $a - \text{Si:H}$ большой площади с высокой степенью однородности по площади и толщине (в том числе и легированные пленки $a - \text{Si:H}$). Указанные методы (скорости осаждения, температуры подложки, последующей термообработки, остаточного давления газов в установке) позволяют получать аморфные слои, сильно различающиеся по свойствам (см., например, табл. 15.11 и 15.12).

При получении аморфного кремния методом разложения SiH_4 в тлеющем разряде в продуктах реакции содержится 5—50 мол. % водорода, а вместо чистого кремния — макромолекулы сетчатого полимера полициклосилана. Состав получаемых пленок зависит от типа разряда, его мощности, парциального давления и расхода SiH_4 , температуры подложки. В общем, содержание водорода уменьшается при повышении температуры подложки;

Т а б л и ц а 15.11
Дрейфовая подвижность электронов в $a - \text{Si:H}$, полученном методами тлеющего разряда и реактивного распыления [15.15]

Метод получения *	Подвижность при комнатной температуре, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Энергия активации, эВ	Диапазон температур, К	Материал
ТРПТ	0,02 — 0,05	0,19 0,16	330—270 < 270	Слабелегированный n -типа То же
ВЧТР	0,03 — 0,1 0,07	0,13 — 0,16 0,19 0,09	< 330 320—250 < 250	» Нелегированный То же
	0,005 — 0,1	0,17 — 0,19 0,08 — 0,12	320—250 < 250	»
	1	0,2	< 200	»
ВЧТР	0,06 0,06 0,8	0,2 0,13	~ 250 < 315 Нет сведений	» Легированный n -типа Нелегированный
ТРПТ	0,4 — 0,6	—	То же	То же
ВЧРР	0,006 — 0,05 0,07 — 0,15 0,001 — 0,05 0,1 — 0,5 —	— 0,3 0,3 0,18 ± 0,01 0,27	» < 250 400—330 370—290 290—230	» » » »

*ТРПТ — тлеющий разряд на постоянном токе; ВЧТР — высокочастотный тлеющий разряд; ВЧРР — высокочастотное реактивное распыление.

Т а б л и ц а 15.12
Дрейфовая подвижность дырок в $a - \text{Si:H}$, полученном методами тлеющего разряда и реактивного распыления

Метод получения	Подвижность при комнатной температуре, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Энергия активации, эВ	Диапазон температур, К	Материал
ТРПТ	$(5 \div 6) \cdot 10^{-4}$ $(5 \div 6) \cdot 10^{-4}$	0,35 0,26	330—240 < 240	p -типа То же
ВЧТР	$1,5 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	0,3 0,35—0,54	380—260 380—260	Нелегированный Компенсированный
ВЧРР	$(2 \div 4) \cdot 10^{-5}$ 10^{-3} 10^{-3}	0,2 0,32 0,4	400—300 370—240 370—280	Нелегированный » »

*ТРПТ — тлеющий разряд на постоянном токе; ВЧТР — высокочастотный тлеющий разряд; ВЧРР — высокочастотное реактивное распыление.

обычно используют температуру 470—650 К при рабочем давлении 0,05—2,0 мм рт.ст.

Легирование из газовой фазы является наиболее эффективным способом получения a — Si:H различного типа проводимости. Однако при всех последующих технологических операциях при температурах выше 400 °С происходит утрата основных свойств материала из-за эффузии водорода. Другим способом легирования a — Si:H является высокочастотное ионно-плазменное распыление кремниевой мишени в атмосфере аргоноводородной смеси, где легирование материала в процессе его получения осуществляется путем совместного распыления кремниевой мишени и помещаемых на ее поверхности легантов.

Аморфные слои в системах Si—C, Si—Ge и Ge—Sn можно получить теми же методами, что и для Si и Ge.

Свойства некристаллических полупроводников. Концепция плотности электронных состояний для некристаллических материалов остается справедливой в той же мере, что и для кристаллических. Особо важным является вопрос о «состояниях в запрещенной зоне» как примесной, так и собственной природы. Энергетический спектр аморфных полупроводников отличается от спектра кристаллических полупроводников наличием «хвостов» плотности электронных состояний, проникающих в запрещенную зону.

Некоторые существующие модельные представления о состояниях в запрещенной зоне для некристаллических полупроводников представлены на рис. 15.18.

Разность между энергиями краев подвижности в зоне проводимости и валентной зоне называют «запрещенной зоной по подвижности» («щелью по подвижности»). Край зоны подвижности определяется как энергия, отделяющая состояния, являющиеся локализованными от состояний, являющихся нелокализованными. Предполагается, что в идеальном аморфном полупроводнике, в котором все ковалентные связи насыщены и в котором нет крупномасштабных флуктуаций, плотность состоя-

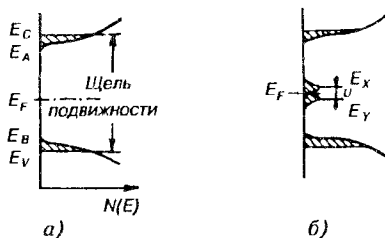


Рис. 15.18. Различные виды плотности состояний, которые, как предполагается, могут осуществляться в аморфных полупроводниках (области, соответствующие локализованным состояниям, заштрихованы):

a — истинная запрещенная зона, которая, как предполагается, может существовать в структуре типа непрерывной случайной сетки без дефектов; b — то же, что в a , но при наличии перекрытия зон донорных (E_D) и акцепторных (E_A) уровней, связанных с одним и тем же дефектом

ний имеет вид, показанный на рис. 15.18, a . Если же в полупроводнике существуют дефекты, например оборванные связи, то в середине запрещенной зоны возникают состояния, которые могут выступать и как доноры (E_D) и как акцепторы (E_A). Эта модель проиллюстрирована на рис. 15.18, b .

Процесс электрического транспорта в некристаллических полупроводниках, где макроскопическая проводимость обусловлена термическим возбуждением в веществе, рассматривают обычно с помощью трех механизмов.

1. Перенос носителей между делокализованными состояниями в зоне проводимости ($E > E_C$) и в валентной зоне ($E < E_V$, рис. 15.18); наличие таких состояний обусловлено ближним порядком в расположении атомов вещества.

2. Перемещение носителей в хвостах зон (E_C — E_A) и (E_B — E_V , рис. 15.18), существование хвостов шириной $\Delta E_{\text{лок}}$ связано с топологическим беспорядком.

3. Прыжки носителей между локализованными состояниями, расположенными в зонах вблизи уровня Ферми E_F (рис. 15.18); эти состояния обусловлены собственными дефектами и посторонними примесями.

Учет всех трех механизмов дает следующее выражение для электропроводности:

$$\sigma = C_1 \exp(-\Delta E_G / kT) + \\ + C_2 \exp[-(\Delta E_1 + \Delta W_1) / kT] + \\ + C_3 \exp(-\Delta W_2 / kT),$$

где C_1 , C_2 и C_3 — предэкспоненциальные множители ($\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$); k — постоянная Больцмана; $\Delta E_G = E_C - E_F$ (для электронов); $\Delta E_1 = E_A - E_F$ (для электронов); ΔW_1 — энергия активации при прыжковом механизме проводимости, осуществляемой носителями заряда, возбужденными в локализованные состояния у краев зон; ΔW_2 — энергия активации при прыжковом механизме проводимости, осуществляемой носителями заряда за счет прыжков между локализованными состояниями с энергией вблизи E_F .

В табл. 15.13 приведены значения проводимости типичных халькогенидных полупроводников, а в табл. 15.14 — дрейфовые подвижности. В качестве примера на рис. 15.19 представлены температурные зависимости дрейфовой подвижности электронов и дырок в аморфных слоях селена от напряженности электрического поля.

В стеклообразных полупроводниках примеси не оказывают такого влияния на проводимость, как это имеет место в кристаллах. Однако экспериментально показано, что некоторые примеси способны сильно изменять электрические свойства стеклообразных полупроводников. В табл. 15.15 приведены данные по влиянию модифицирующих примесей на электрические свойства ХСП. Термин «модифицирование» (или химическая модификация) относится к так называемому холодному легированию, когда в результате сораспыления основного вещества с примесями переходных металлов резко меня-

Т а б л и ц а 15.13

Проводимость типичных халькогенидных стекол [15. 7]

Стекло	C_1 , См/см	$\Delta E_G = E_F - E_V$, эВ	C_2 , См/см	$\Delta E_I = E_F - E_B$, эВ	ΔW_1 , эВ
Se	10^4	1,13	—	—	—
As*	$8 \cdot 10^4$	0,81	13	0,50	0,098
TlAsTe ₂	$1,2 \cdot 10^3$	0,285	1,1	0,165	—
TlAsTe _{1,5} Se _{0,5}	$2,5 \cdot 10^3$	0,355	33	0,280	—
As ₂ Se ₃	—	1,2; 1,06	$1,5 \cdot 10^3$	0,91	0,31
	$1,5 \cdot 10^4$	0,99	$2 \cdot 10^2$	0,78	0,09
As ₂ Te ₃	—	—	$1,5 \cdot 10^3$	0,42 (330 К) 0,38 (130 К) 0,46 (> 230 К)	0,17 0,13 —
				0,44	—
AsTe _{1,5} Si _{0,25}	3200	0,46	90	0,383	—
AsTe _{1,5} Si _{0,44}	3200	0,615	70	0,515	—
AsTe	—	—	—	0,44	0,19
As ₅ Te ₉ I	—	—	—	0,36	0,04
As ₅ Te ₁₂	—	—	—	0,45	0,18
AsTe ₁₆ Ge ₃	—	—	—	0,43	0,19
Ge ₂ Se ₃ *	$5,6 \cdot 10^3$	1,16	0,59	0,89	—
Ge ₂ Se ₂ Te*	$9,2 \cdot 10^2$	0,86	0,0023	0,56	—
CdAs ₂	$7,5 \cdot 10^4$	0,67	$4,8 \cdot 10^2$	0,453	—

* В этих материалах преобладает электронная проводимость.

Т а б л и ц а 15.14

Дрейфовая подвижность μ_D в некристаллических твердых телах

Вещества	$\mu_D(n)$, см ² /(В·с)	$E_C - E_I$, эВ	$\mu_D(p)$, см ² /(В·с)	$E_I - E_V$, эВ
Se	$3 - 6 \cdot 10^{-3}$ (300 К)	0,29—0,33	$1 - 2 \cdot 10^{-1}$	0,13—0,28
As ₂ Se _{2,3}	$1,3 \cdot 10^{-4}$	0,44	—	—
As ₂ Se ₃	—	—	$2 \cdot 10^{-6}$	0,53
GeSe ₂	$1,4 \cdot 10^{-1}$	—	$4 \cdot 10^{-2}$	—
GeSe ₄	$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,28	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,42
Ge ₂ Se ₃	$7,4 \cdot 10^{-1}$	—	$1,6 \cdot 10^{-2}$	—
Se _{97,3} Te _{2,7}	$9,6 \cdot 10^{-4}$	0,25	$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,25
As _{6,6} Se _{87,0} Te _{6,4}	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,29	$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,14
SiO ₂	$< 10^{-5}$	—	20—40	—

П р и м е ч а н и е. E_I — энергия ловушек.

ется электропроводность пленок, чего не удается добиться введением той же примеси при синтезе массивных стекол, т.е. через расплав.

Температурная зависимость фотопроводимости большинства аморфных полупроводников изменяется так, как показано на рис. 15.20. В области высоких температур (режим I) фотопроводимость экспоненциально растет с $1/T$, обнаруживая хорошо определенную энергию активации. Кроме того, имеется линейная зависимость от интенсивности возбуждающего света. При более низких температурах

(режим II) фотопроводимость уменьшается с $1/T$ и пропорциональна квадратному корню из интенсивности света. При еще более низких температурах (режим III) кривые фотопроводимости достигают насыщения. Максимум температурной зависимости обычно имеет место вблизи температуры, при которой «темновой» ток превышает фототок.

Для более подробного ознакомления со структурой, свойствами и применением аморфных полупроводников рекомендуются монографии [15.14—15.16]

Таблица 15.15

Электрические свойства некоторых халькогенидных стекол в зависимости от вводимой примеси [15.7]

Стекло	σ , См/см (300 К)	$E\sigma$, эВ	Содержание примеси	σ , См/см	$E\sigma$, эВ
Se	10^{-18}	1,13	0,002 % O 0,05 % Cl 0,1 мол. % K	10^{-11} 10^{-9} 10^{-13}	0,75 0,56
As_2Se_3	10^{-12} $6 \cdot 10^{-13}$ 10^{-12}	0,99 0,86 0,9	5 мол. % Cu 2,4 мол. % Cu 28,6 мол. % Te	10^{-8} $6 \cdot 10^{-11}$ $2,5 \cdot 10^{-7}$	0,68 0,61 0,48
		0,92	3 мол. % Ga 0,2 мол. % B 0,6 мол. % In 0,4 мол. % Al 1 мол. % Mn		0,75 0,75 0,75
$As_{30}Si_{12}Ge_{10}Te_{48}$	$4 \cdot 10^{-8}$	0,68		$4 \cdot 10^{-7}$	0,5
$(PbSe)_y(Ge_2Se_3)_{0,5-0,5y}$ ($y=0$)	$6,3 \cdot 10^{-15}$		$y=0,40$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	0,70
$(PbSe)_y(GeSe)_{0,65-y}$ $(GeSe_2)_{0,35}$ ($y=0$)	$1,8 \cdot 10^{-15}$	0,97	$y=0,45$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	0,65
$Ge_{0,4-x}Sn_xSe_{0,5}Te_{0,1}$ ($x=0$)	10^{-15}	0,78	$x=0,08$	$5 \cdot 10^{-10}$	0,63
$Ge_{0,4-x}Sn_xSe_{0,4}Te_{0,2}$ ($x=0$)	$2 \cdot 10^{-13}$	0,56	$x=0,12$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	0,47

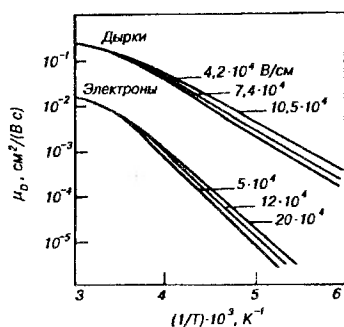


Рис. 15.19. Зависимость дрейфовых подвижностей электронов и дырок в аморфных слоях селена от температуры и напряженности электрического поля

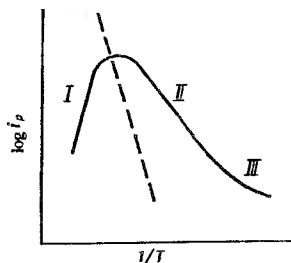


Рис. 15.20. Температурная зависимость фототока в халькогенидных полупроводниках (штриховой линией показана зависимость для «темнового» тока)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

15.1. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

15.2. Горелюк С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М.: Металлургия, 1986.

15.3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986.

15.4. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. М.: Высшая школа, 1975.

15.5. Медведев С.А. Введение в технологию полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1970.

15.6. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических полупроводниках: Пер. с англ./ Под ред. Б.Т.Коломиец. Изд. 2-е в 2-х т. М.: Мир, 1982.

15.7. Фельтц А. Аморфные и стеклообразные, неорганические твердые тела: Пер. с нем. М.: Мир, 1986.

15.8. Аморфные полупроводники: Пер. с англ./ Под ред. М.Бродски. М.: Мир, 1982.

15.9. Борисова З.У. Химия стеклообразных полупроводников. Л.: ЛГУ, 1972.

15.10. Борисова З.У. Халькогенидные полупроводниковые стекла. Л.: ЛГУ, 1983.

15.11. Физика гидрогенизированного аморфного кремния: вып. II. Электронные и колебательные свойства: Пер. с англ./ Под ред. Дж.Джоунупуло-са, Дж.Люковски. М.: Мир, 1988.

15.12. Виноградова Г.З. Стеклообразные и фазовые равновесия в халькогенидных системах. М.: Наука, 1984.

15.13. Полтавцев Ю.Г. Структура полупроводниковых расплавов. М.: Металлургия, 1984.

15.14. Дембовский С.А., Четчин Е.А. Стеклообразование. М.: Наука, 1990.

15.15. Аморфные полупроводники и приборы на их основе: Пер. с англ./ Под ред. И.Хамакавы. М.: Металлургия, 1986.

15.16. Баратов А.Г., Попов А.И. Молекулярная структура и свойства халькогенов (сера, селен, теллур). Ереван: Айастан, 1990.

Раздел 16

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

16.1. Определения, классификация, свойства	346	16.4. Материалы для комммутирующих и скользящих контактов	351
16.2. Металлы высокой проводимости для токопроводящих цепей	347	16.5. Материалы для резисторов и электронагревательных элементов	355
16.3. Металлические сплавы для токопроводящих шин, деталей и узлов электротехнических машин и аппаратов ..	350	16.6. Сверхпроводниковые материалы	358
		Список литературы	365

16.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА

Проводниками называются вещества, внутри которых в случае электростатического равновесия электрическое поле равно нулю, т.е. некомпенсированные заряды проводников локализируются в бесконечно тонком поверхностном слое, а если электрическое поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток.

Проводниковые свойства проявляют как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы.

В электротехнике из твердых проводников наиболее широко используются металлы и их сплавы, различные модификации проводящего углерода и композиции на их основе.

Металлические проводниковые материалы подразделяются на материалы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления. Металлы высокой проводимости используются в тех случаях, когда необходимо обеспечить минимальные потери передаваемой по ним электрической энергии, а сплавы высокого сопротивления, наоборот, в тех случаях, когда необходима трансформация электрической энергии в тепловую.

К жидким проводникам относятся расплавы и электролиты. Если при прохождении тока через жидкие проводники на электродах не происходит выделения продуктов электролиза, то они относятся к проводникам первого рода. Расплавы ионных кристаллов и электролиты относятся к проводникам второго рода, так как при прохождении через них тока происходит перенос вещества, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Газы и парообразные вещества становятся проводниками лишь в определенных диапазонах значений давления, температуры и напряженности электрического поля. Близка к газам по своему агрегатному состоянию особая проводящая среда — плазма.

К особой группе проводящих материалов относятся сверхпроводники.

Современная теория проводников основывается на постулатах квантовой механики. В рамках этой теории предполагается, что при отсутствии внешних воздействий (электрические и магнитные поля, градиент температуры) система подвижных элект-

рических зарядов в проводниках описывается равновесной функцией распределения. Реакция на любое внешнее воздействие, нарушающее равновесное состояние подвижных зарядов, может быть описана с помощью неравновесной функции распределения, конкретный вид которой зависит от типа воздействия и определяется на основе решения кинетического уравнения Больцмана. Количественная связь между внешним воздействием и реакцией на него подвижных носителей заряда описывается с помощью кинетических коэффициентов, из которых наиболее важную практическую роль играют коэффициент электрической проводимости (выражает связь между напряженностью электрического поля в проводнике и плотностью тока) и коэффициент тепловой проводимости (выражает связь между разностью температур на единичной длине проводника и тепловым потоком). Математически эти явления описываются законами Ома и Фурье:

$$J = \gamma E \quad \text{и} \quad \omega = \chi \Delta T,$$

где E — напряженность электрического поля, В/м; J — плотность тока, А/м; ω — плотность теплового потока, Вт/м; ΔT — разность температур на единичном участке длины проводника, К/м; γ — коэффициент электрической проводимости (удельная электрическая проводимость), См/м; χ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

При наличии градиентов температуры и потенциала в одном или нескольких соединенных проводниках возникает ряд термоэлектрических эффектов. Самые важные из них — эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Если градиент температуры вдоль проводника не равен нулю, то на его концах появляется разность потенциалов, называемая термоэлектрической разностью потенциалов, или термоэлектродвижущей силой. При разности температур в 1 К эта разность потенциалов называется удельной (дифференциальной) термоэлектродвижущей силой. В разомкнутой цепи из нескольких разнородных проводников, находящихся при одинаковой температуре, появляется контактная разность потенциалов, равная алгебраической сумме разностей работ выхода электронов из проводников. При замыкании такой цепи ток не возникает, так как контактные разности потенциалов компенсируют друг друга. Если же поддержи-

вать контакты при разных температурах, возникает отличная от нуля термоэлектродвижущая сила, называемая (при разности температур в 1 К) относительной удельной термоэлектродвижущей силой. По имени физика, изучавшего это явление, оно получило название эффекта Зеебека. Этот эффект, положенный в основу работы промышленных термопар, наиболее изучен. Эффект Пельтье состоит в выделении обратимого тепла на контакте двух различных проводников, когда через контакт проходит ток. Эффект Томсона состоит в выделении обратимой теплоты, когда в проводнике протекает ток при наличии градиента температуры.

При одновременном воздействии на проводник электрического и магнитного полей возникают гальваномагнитные эффекты.

Наиболее полно к настоящему времени развита теория металлических проводников. Еще на рубеже XIX — XX вв. теоретически и экспериментально было показано, что если металл находится в твердом или жидком состоянии, то часть электронов делокализуется, а возникающие в результате этого положительно заряженные ионы образуют (если металл находится в твердом состоянии) кристаллическую решетку. Взаимодействие положительно заряженного остова кристаллической решетки с делокализованными электронами обеспечивает стабильность и устойчивость структуры металлов, а наличие электронов, принадлежащих не отдельным атомам, а всей их совокупности, обеспечивает высокую электрическую проводимость металлов. Однако наиболее точные расчеты кинетических коэффициентов получены на основе современной теории металлов, в которой совокупность делокализованных электронов рассматривается как «Ферми-жидкость», подчиняющаяся статистике Ферми. Наибольшую практическую ценность представляют результаты теоретического исследования электрической проводимости металлов.

В современной теории электропроводности показано, что в идеальной кристаллической решетке электрический или тепловой поток, однажды возникнув, поддерживался бы бесконечно долго, т.е. делокализованные электроны создавали бы бесконечную проводимость, а время релаксации (среднее время свободного пробега электронов) оказалось бы бесконечным. Тот факт, что удельная электрическая проводимость конечна, обусловлен нерегулярностями решетки. Эти нерегулярности делятся на две основные категории. Одни связаны с тепловыми колебаниями, другие являются статистическими. Тепловые колебания решетки нарушают идеальную периодичность кристаллов. Искажения решетки рассеивают электроны, ограничивая длину свободного пробега конечным значением. С уменьшением температуры интенсивность рассеивания уменьшается, и так как ограничения, налагаемые статистикой Ферми, препятствуют рассеянию на нулевых колебаниях, то в области температур, близких к абсолютному нулю, проводимость ограничивается статическими дефек-

тами. Обычно существует целый ряд статических дефектов. Вакансии, межузельные атомы и примеси замещения составляют группу точечных дефектов. Дислокации являются линейными дефектами. Существуют и двумерные нерегулярности, такие как дефекты упаковки и границы двойников и кристаллитов.

В итоге теория предсказывает, а эксперимент подтверждает, что в области низких температур (меньших температуры Дебая Θ) удельная электропроводность γ пропорциональна T^{-5} , а при $T > \Theta$ $\gamma \sim T^{-1}$, где T — температура перехода.

В практике проведения электротехнических расчетов часто используется не удельная проводимость, а величина, ей обратная, ρ (Ом·м). Учитывая это, $\rho \sim T$ при $T > \Theta$. Для большинства металлов температура Дебая лежит в области от 100 до 400 К.

В технических расчетах влияние температуры на сопротивление характеризуют температурным коэффициентом удельного сопротивления

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}.$$

В настоящем справочнике приводится средняя величина α , которая позволяет приблизительно определить ρ при произвольной температуре

$$\rho = \rho_1 [1 + \alpha(T - T_1)],$$

где ρ_1 — удельное сопротивление при температуре T_1 .

Основные физические свойства металлов приведены в табл. 16.1.

16.2. МЕТАЛЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЦЕПЕЙ

Наиболее широко в электротехнике используются медь и алюминий. Являясь материалами высокой проводимости, эти металлы допускают все виды механической обработки, что позволяет изготавливать токопроводящие элементы практически любой формы и протяженности. Их несомненным достоинством является достаточно высокая прочность и стойкость по отношению к нагрузкам. Преимущества этих металлов настолько велики, что выбор материалов для токопроводящих элементов обычно ограничивается или ими самими, или их модификациями. Конкретный же выбор между медью и алюминием осуществляется на основе технической необходимости и экономической эффективности, оценить которые можно на основе данных, приведенных в табл. 16.2.

При выборе проводящих материалов для токопроводящих цепей, работающих в переменных электромагнитных полях, необходимо учитывать поверхностный эффект. В табл. 16.3 приводятся основные электромагнитные параметры медных и алюминиевых проводников при разных частотах.

Т а б л и ц а 16.1

Главнейшие усредненные свойства металлов при 300 К

Металл	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Плотность, Мг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления, 10 ⁻⁴ К	Работа выхода электронов, эВ
Ртуть	-38,9	357	13,60	138	10	61,0	0,958	9	4,5
Цезий	28,5	700	1,87	234	—	95,0	0,210	48	1,9
Галлий	29,7	2070	5,91	381	—	18,0	0,560	—	—
Калий	63,7	775	0,87	753	92	80,0	0,069	58	2,2
Натрий	97,8	883	0,97	1260	125	70,0	0,046	50	2,3
Индий	156,0	2075	7,28	243	25	25,0	0,090	47	—
Литий	186,0	1220	0,53	3620	71	—	—	—	—
Олово	232,0	2260	7,31	226	65	23,0	0,120	44	4,4
Кадмий	321,0	767	8,65	230	93	30,0	0,076	42	4,0
Свинец	327,0	1620	11,40	130	35	29,0	0,210	37	—
Цинк	420,0	907	7,14	390	111	31,0	0,059	—	—
Магний	651,0	1103	1,74	1040	167	26,0	0,045	42	3,6
Алюминий	657,0	1800	2,70	922	209	24,0	0,028	42	4,3
Барий	710,0	1637	3,50	268	—	17,0	0,500	25	—
Серебро	961,0	1950	10,50	234	415	19,0	0,016	40	4,4
Золото	1063,0	2600	19,30	126	293	14,0	0,024	38	4,8
Медь	1083,0	2300	8,94	385	390	16,0	0,017	43	4,3
Бериллий	1284,0	2500	1,85	200	167	13,0	0,040	60	3,9
Никель	1455,0	2900	8,90	444	95	13,0	0,073	65	5,0
Кобальт	1492,0	2900	8,71	435	79	12,0	0,062	60	—
Железо	1535,0	3000	7,87	452	73	11,0	0,098	60	4,5
Палладий	1554,0	2200	12,10	243	72	12,0	0,110	—	—
Титан	1725,0	2800	4,50	577	15	8,1	0,480	33	—
Хром	1850,0	2430	7,10	—	—	6,5	0,210	—	—
Платина	1770,0	4240	21,40	134	71	9,0	0,105	—	—
Торий	1850,0	3500	11,50	113	—	11,2	0,186	23	3,3
Цирконий	1860,0	4900	6,50	276	17	5,4	0,410	45	3,7
Иридий	2350,0	4800	22,50	—	—	—	—	—	—
Ниобий	2410,0	3300	8,57	272	50	7,2	0,140	30	4,0
Молибден	2620,0	3700	10,20	264	151	5,1	0,057	46	4,2
Тантал	2850,0	4200	16,70	142	54	6,5	0,135	38	4,1
Рений	3180,0	—	20,50	138	71	4,7	0,210	32	4,8
Вольфрам	3380,0	5500	19,30	218	168	4,4	0,055	46	4,5

Т а б л и ц а 16.2

Свойства медной и алюминиевой проволоки

Параметр	Медь твердая	Медь мягкая	Алюминий твердый	Алюминий мягкий
Удельное сопротивление, мкОм·м	0,0179—0,0182	0,01724—0,01754	0,0295	0,028—0,029
Отношение сопротивления расплавленного металла к сопротивлению твердого при температуре плавления $T_{пл}$	2,07		1,64	
Температурный коэффициент удельного сопротивления при $T = -0 \div 150$ °С, К	$4,3 \cdot 10^{-3}$		$4 \cdot 10^{-3}$	
Удельная теплоемкость при $T = -20$ °С, Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	386		920—960	
Коэффициент теплопроводности при $T = 20$ °С, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	385—400		209	
Температурный коэффициент линейного расширения при $T = -21 \div 100$ °С, 10^{-6} К ⁻¹	16,4		24	
Временное сопротивление разрыву, МПа	250—500	200—280	150—170	80—90
Предел пропорциональности, МПа	170—200	22—30	70—80	25
Предел текучести, МПа	230—380	60—70	100—130	35—45
Относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$, %	0,5—5,0	18—50	12—14	30—33
Модуль упругости, ГПа: статический динамический	122—132 112	117 74	72 66	66 54
Число Бринелля	65—120	35—38	33	25
Удельная ударная вязкость, кДж·м ⁻²	—	1560	1200	900
Плотность при 20 °С, Мг·м ⁻³	8,89		2,703	

Т а б л и ц а 16.3

Электромагнитные параметры медных и алюминиевых проводников

Металл	Частота, Гц	Фазовая скорость, м/с	Длина волны, м	Глубина проникновения, м
Медь $\gamma = 5,8 \cdot 10^7$ См·м ⁻¹ $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ Гн·м ⁻¹	50	2,9	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
	800	11,7	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
	10^6	415	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
	10^{10}	41 500	$4,15 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$
Алюминий $\gamma = 3,5 \cdot 10^7$ См·м ⁻¹ $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ Гн·м ⁻¹	50	3,8	$7,6 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$
	800	15,1	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
	10^6	535	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$
	10^{10}	53 500	$5,35 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$

16.3. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ШИН, ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ

Для изготовления различных токопроводящих деталей электрооборудования, стержней короткозамкнутых роторов асинхронных электродвигателей, прижимных контактов электрических аппаратов широко используются простая латунь или многокомпонентные сплавы на основе меди, в которых основной легирующей добавкой является цинк.

Прочность латунных материалов и сплавов характеризуется параметрами σ_p , σ_T , σ_H — усилия линейного растяжения, при термическом воздействии и на изгиб соответственно.

Медно-цинковые сплавы по сравнению с медью обладают более высокой механической прочностью и повышенным значением удельного электрическо-

го сопротивления. Латунь подразделяется на обрабатываемую давлением и литьем.

В электротехнике более широкое применение находит латунь, обрабатываемая давлением. Ее основные свойства приведены в табл. 16.4.

Для изготовления троллейных проводов, коллекторных пластин, контактных ножей, скользящих контактов, токоведущих пружин, упругих контактов и т. п. широко используется бронза.

Бронза представляет собой медный сплав и по сравнению с медью отличается высокой механической прочностью, твердостью, упругостью и стойкостью к истиранию.

Бронза подразделяется на группы: бронза оловянная, обрабатываемая давлением; бронза литейная; бронза безоловянная литейная. Общие электрические и механические свойства бронзы приведены в табл. 16.5.

Для изготовления токопроводящих шин, фоль-

Т а б л и ц а 16.4

Электрические и механические свойства латуни

Марка	Плотность, $\text{Мг} \cdot \text{м}^{-3}$	ρ при 20 °С, $\text{мКОм} \cdot \text{м}$	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-3} К^{-1}	σ_p , МПа		Число Бринелля	Удельная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Температурный коэффициент линейного расширения, 10^{-6} К^{-1}
				мягкой латуни	твердой латуни			
Л68	8,5—8,6	0,070	1,0	300	650—800	58	109	18,0
Л90	8,6—8,8	—	—	250	270	—	155	18,5
Л96	8,8	0,043	1,7	245	510	50—120	245	17,0
ЛС59-1	8,5	0,065	1,7	340—400	450—650	75	105	18,5
ЛМц58-2	8,5	0,108	1,3	350—450	500—600	80—140	92	21,2
ЛО62-1	8,5	0,069	2,1	—	—	—	99	18,1
ЛК80-3	7,9—8,3	0,25—0,39	0,475	250—300	650—900	100—237	—	18,8—20,8
ЛЖМц59-1-1	8,5	0,09	1,8	380—450	500—520	80—90	101	20,3
ЛМцА57-3-1	8,3	0,1	9,0	175—280	500—600	—	—	22,6

Т а б л и ц а 16.5

Электрические и механические свойства бронзы

Свойства	Марка								
	06,5-0,15	ОЦЧ-3	А5	АМц9-2	АЖ9-4-10-3-1,5	АЖМ-10-4-4	АЖН	Б2	КМц3-1
Плотность при 20 °С, $\text{Мг} \cdot \text{м}^{-3}$	8,8	8,8—8,9	8,2	8,0—8,2	7,5—7,6	7,5—8,1	8,2	8,2	8,4—8,5
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{ К}^{-1}$	105	63—92	103	63	61	48—59	75	7,5—84	33—42
Температурный коэффициент линейного расширения при $T = 20 \div 100^\circ \text{С}$, 10^{-6} К^{-1}	17—18	18	16—17	17—20	20	15—17	19	—	16
Удельное электрическое сопротивление, $\text{мКОм} \cdot \text{м}$	0,13	0,095	0,1	0,6—0,18	0,11	0,19—0,28	0,175	0,065	0,265
Температурный коэффициент удельного сопротивления при $T = 20 \div 100^\circ \text{С}$, 10^{-4} К^{-1}	7,3	—	8,0	7,4—8,5	13,0	3,2	4,6	—	1,2

Т а б л и ц а 16.6
Электрические и механические свойства шин из
алюминиевых сплавов

Марка	Состояние шин	$\sigma_{\text{и}}$ МПа	$\sigma_{\text{т}}$ МПа	$\Delta l/l$, %	ρ при 20 °С, мкОм · м
		Не менее			Не более
АД0	Без термической обработки Закаленные и естественно состаренные	60—70	—	—	0,029
		130	60	13	0,035
АД31	Закаленные и искусственно состаренные	200	150	8	0,032

ги, роторов асинхронных электродвигателей и других подобных изделий широко используются сплавы на основе алюминия, причем их электрические, механические и технологические свойства легко регулируются легирующими добавками. По способу изготовления изделий алюминиевые сплавы делятся на деформированные и литейные.

Токпроводящие шины и электротехническая проволока изготавливаются из алюминиевых сплавов с примесями магния и кремния АД0 и АД31, основные свойства которых приведены в табл. 16.6.

Короткозамкнутые роторы асинхронных электродвигателей общего назначения обычно изготавливаются из алюминия марок А5 или А7. Для изготовления роторов двигателей с особыми характеристиками применяются сплавы, приведенные в табл. 16.7. Высокими литейными свойствами обла-

дают сплавы марок АК10, АКМ10-2, АКМ12-4 и АКЦ11-12. Ограниченными литейными свойствами обладают чистый алюминий и сплавы марок АК3, АКМ2-1 и АКМ4. Сплавы АМ7 и АКМ1-9 имеют невысокие литейные свойства и применяются лишь в специальных случаях.

16.4. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОММУТИРУЮЩИХ И СКОЛЬЗЯЩИХ КОНТАКТОВ

По условиям работы контакты подразделяются на два типа: коммутирующие, скользящие.

Коммутирующие контакты служат для управляемого замыкания и размыкания электрической цепи. К скользящим относятся контакты, поверхности которых скользят одна относительно другой: щетка-коллектор; щетка-контактное кольцо; щетка-резистивный элемент.

Материалы для коммутирующих и скользящих контактов должны быть стойкими к коррозии, электрической эрозии и износу, не свариваться, иметь высокую механическую прочность и износостойкость, особенно на истирание, и, естественно, обладать высокой проводимостью и теплопроводностью.

Коммутирующие контакты подразделяются на слаботочные (токи от долей до единиц ампер) и сильноточные (токи от единиц до тысяч ампер).

Слаботочные контакты изготавливаются преимущественно из серебра, платины, палладия, золота, вольфрама и сплавов на их основе. Электрические и механические свойства металлов и сплавов для этих контактов приведены в табл. 16.8.

Лучшими из этих материалов являются металлы и сплавы платиновой группы. Контакты из платины не покрываются диэлектрическими пленками, что обеспечивает стабильное переходное сопротивление.

Т а б л и ц а 16.7
Свойства алюминиевых сплавов для заливки роторов асинхронных двигателей

Марка	Удельная проводимость, МСм/м при температуре			Средний температурный коэффициент линейного расширения при $T = -20 \div 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Механические свойства образцов, отлитых в кокиль		
	20 °С	100 °С	150 °С				Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Число Бринелля
Алюминий чистый	32	24,0	21,0	23,4	2700	658	90—120	20—30	20—25
АКМ2-1	25	19,5	17,5	22,8	2750	580—650	100—140	6—10	35—50
АК3	25	19,5	17,5	23,0	2650	580—650	100—140	6—10	35—50
АК10	19	14,5	13,0	21,0	2600	580—600	120—140	3—5	45—60
АКМ4-4	19	15,5	14,5	22,9	2850	580—620	140—180	3—2	50—70
АМг7	19	12,5	11,5	23,5	2600	550—600	160—200	2—6	60—80
АКМ12-4	15	12,5	11,5	21,0	2750	540—620	140—180	1—3	50—70
АКМц10-2	15	12,5	11,0	21,0	2700	580—600	140—160	1—2	60—70
АКЦ11-12	12	10,5	10,0	21,4	3090	525—600	180—300	0,8—2	90—140
АКМг1-9	12	10,5	10,0	24,5	2550	550—605	160—200	0,5—1,5	70—85

Т а б л и ц а 16.8

Свойства металлов и сплавов для слаботочных контактов

Марка	Химический состав, %	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Число Бринелля	Удельное сопротивление, мкОм·м	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)
Пл99,9-99,7	Платина 99,7-99,9	21 450	1773	40	0,105	71
Пд99,9-99,8	Палладий 99,8-99,9	12 160	1554	32	0,108	71
Рд99,9-99,8	Родий 99,8-99,9	12 400	1966	55	0,045	88
Зл999-999,9	Золото 99,9-99,99	19 300	1063	20	0,022	311
Ср999-999,9	Серебро 99,9-99,99	10 500	961	25	0,016	408
ПлИ-10	Платина-иридий 90/10	21 540	1795	126	0,250	31
ПлИ-25	Платина-иридий 75/25	21 680	1875	246	0,330	16
ПлРу-10	Платина-рутений 90/10	19 950	1780	190	0,430	—
ПлН-4,5	Платина-никель 95,5/4,5	20 170	1700	135	0,230	—
ПлРд-10	Платина-родий 90/10	20 000	1840	90	0,192	—
—	Платина-вольфрам 95/5	21 280	1850	103	0,402	—
—	Платина-молибден 90/10	20 500	1800	195	0,585	—
ПдИ-10	Палладий-иридий 90/10	12 740	1565	125	0,260	—
ПдИ-18	Палладий-иридий 82/18	13 250	1580	195	0,360	—
ПдСр-20	Палладий-серебро 80/20	11 790	1425	56	0,300	—
ПдСр-10	Палладий-серебро 60/40	11 440	1330	52	0,420	31
ЗлСр750-250	Золото-серебро 75/25	19 960	1044	26	0,099	—
ЗлПл-7	Золото-платина 93/7	19 440	1160	40	0,102	70
ЗлН5	Золото-никель 95/5	18 240	990	100	0,123	—
—	Золото-серебро-платина 69/25/6	16 100	1030	112	0,149	55
ЗлСрМ583-300	Золото-серебро-медь 58/30/12	13 920	835	125	0,108	—
—	Золото-серебро-никель 70/25/5	15 400	1050	80	0,118	—
—	Золото-палладий-никель 65/30/5	16 500	1410	120	0,230	—
СрМ960	Серебро-медь 96/4	10 430	880	43	0,018	380
СрМ925	Медь-серебро 92/5/7,5	10 360	779	57	0,019	350
СрМ900	Серебро-медь 90/10	10 320	779	64	0,019	345
СрМ750	Серебро-медь 75/25	10 060	779	82	0,020	325
СрПл-12	Серебро-платина 88/12	11 190	870	115	0,120	—
СрПд-20	Серебро-палладий 80/20	10 790	1070	35	0,102	92
СрКд86-14	Серебро-кадмий 86/14	10 200	895	52	0,029	—
ВРН	Вольфрам 99,85	19 300	3410	250	0,055	168
МЧ	Молибден 99,958	10 200	2620	150	0,052	146
—	Вольфрам-молибден 95/5	—	3180	280	0,065	—

ление, имеют минимальный ток дугообразования, однако подвержены мостиковой эрозии. Чаще всего платина используется в качестве основы для контактных сплавов. Причем, если Ni, Ag, Ir, Os, Ru и W сильно повышают твердость и удельное электрическое сопротивление сплавов, то в меньшей степени это относится к радио и палладию. Из сплавов платина-никель наиболее известен сплав ПЛН-4,5. Основная ценность этого сплава — высокая стойкость к мостиковой эрозии и свариванию. Серебро образует с платиной ограниченные области растворов, и поэтому применяют серебряные сплавы с примесью платины.

Иридий и радий образуют с платиной непрерывный ряд растворов. В нашей стране наиболее распространены Pt-Ir контактные сплавы ПЛИ-10 и ПЛИ-25. Они отличаются высоким минимальным током дугообразования и стойкостью к электрической эрозии. Платино-рутениевые сплавы можно рассматривать как заменители сплавов Pt-Ir. Легирование платины вольфрамом резко повышает температуру плавления, твердость и удельное сопротивление сплава. Аналогичное действие оказывает на платину примесь молибдена.

По своим свойствам палладий уступает платине, но имеет меньшую стоимость и его сплавы широко применяются.

Золото и серебро отличаются невысокой прочностью и твердостью. Основным достоинством этих материалов являются их высокая электрическая проводимость и теплопроводность, что обеспечивает минимальный разогрев контактной зоны. Оксиды серебра электропроводны, однако в атмосфере сероводорода и влаги на контактах образуются непроводящие пленки сульфида серебра. Легирование серебра медью повышает твердость и стойкость к электрической эрозии, однако в условиях образова-

ния дуги богатые медью сплавы непригодны вследствие окисления. Золото применяется для изготовления прецизионных контактов, работающих при малом сжимающем усилии и низком напряжении. Распространены контактные сплавы золота с серебром, никелем и платиной. Замена драгоценных металлов на более дешевые или использование их в качестве гальванических покрытий экономически выгодна. Осажденные слои более стойки к электрической эрозии и намного тверже массивных материалов, однако применяются лишь в условиях работы без дуговых контактов.

Достоинствами вольфрамовых и молибденовых контактов являются стойкость к появлению дуговых разрядов, электрической эрозии и свариванию. Для работы в вакууме и среде инертных газов применяются контакты из сплава W-Mo.

Сильноточные коммутрующие контакты изготавливаются чаще всего из металлокерамических композиций, получаемых методом порошковой металлургии. Композиционный материал представляет собой смесь ингредиентов, один из которых обладает значительно большей тугоплавкостью, чем другие. Поэтому при переходе одного из ингредиентов в жидкое состояние он удерживается силами поверхностного натяжения в порах тугоплавкой матрицы. В условиях высоких токовых и механических нагрузок, когда материал контактов из чистых металлов расплавляется, композиционные материалы незаменимы. При средних нагрузках замена серебра на серебряные композиции позволяет значительно увеличить срок службы контактов, повысить надежность и при этом уменьшить расходы на их эксплуатацию.

Основные электрические и механические свойства материалов для сильноточных контактов приведены в табл. 16.9.

Т а б л и ц а 16.9

Состав и свойства металлокерамических контактов

Марка	Компоненты и их содержание, %	Плотность, кг·м ⁻³	Число Бринелля	Удельное сопротивление, мкОм·м, не более	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°C)
КМК-А10мн	Серебро-окись кадмия, 85/15	9700	100	0,028	325
КМК-А30	Серебро-никель, 70/30	9600	75	0,030	355
КМК-А30м	То же с мелкодисперсной структурой	9700	105	0,029	360
КМК-А31	Серебро-никель, 60/40	9500	80	0,035	310
КМК-А31м	То же с мелкодисперсной структурой	9600	115	0,035	310
КМК-А41	Серебро-графит, 97/3	9300	50	0,026	—
КМК-А40	Серебро-графит, 95/5	8700	40	0,030	420
КМК-А32	Серебро-никель-графит, 68/29/3	8900	65	0,035	355
КМК-А33мд	Серебро-никель-графит, 69/29/3	9500	95	0,035	—
КМК-А60	Серебро-вольфрам-никель, 48/50/2	13 500	160	0,041	275
КМК-А61	Серебро-вольфрам-никель, 27/70/3	1500	210	0,045	230
КМК-Б10	Медь-графит, 97/3	7300	35	0,040	380
КМК-Б20	Медь-вольфрам-никель, 48/50/2	12 100	150	0,060	190
КМК-Б21	Медь-вольфрам-никель, 27/70/3	13 800	200	0,070	135
КМК-Б00	Медь	8600	65	0,021	—

Контакты из композиций на основе серебра Ag-CdO наиболее широко используются в низковольтных аппаратах. Они надежны в работе при повышенных токовых нагрузках, обладают повышенной износостойкостью.

Композиция Ag-Ni также используются при изготовлении контактов для низковольтных аппаратов. Эти контакты отличаются стойкостью к электрическому износу, низким и стабильным переходным сопротивлением и применяются в аппаратах переменного и постоянного тока.

Контакты из композиций серебро-графит стойки к свариванию и механическому износу, отличаются низким и стабильным переходным сопротивлением, но характеризуются повышенным электрическим износом и ограниченной твердостью.

Композиции серебро-никель-графит применяются в контактах низковольтных аппаратов со значительными токовыми нагрузками и перегрузками. Надежность контактов повышается, если матрицу композиции выполнять с мелкодисперсной структурой. Следует отметить, что контакты из композиций серебро-никель-графит и серебро-графит применяются в паре с контактом из композиции серебро-никель, так как они имеют повышенную износостойкость.

Для контактов, отключающих токи 30—100 кА, используются композиции медь-графит. Контакты из композиции медь-вольфрам отличаются более высокой износостойкостью, стойкостью к свариванию и оплавлению. Чаще всего эти композиции применяются для контактов высоковольтных масляных выключателей.

Чистая медь из-за склонности к атмосферной

коррозии с образованием оксидных и сульфидных пленок непригодна для слаботочных контактов, однако применяется в силовых аппаратах.

Необходимость в скользящих контактах возникает в тех случаях, когда источник и приемник энергии находятся в непрерывном движении один относительно другого, например, в устройствах токосъема электротранспорта, коллекторных и синхронных электродвигателях, а также генераторах постоянного и переменного тока.

При выборе материалов для скользящих контактов необходимо учитывать, что из всей совокупности требований к материалам контактных пар основными являются стойкость к механическому износу и электрической эрозии. В наибольшей мере этим требованиям удовлетворяет сплав металл-графит. Продукты износа графитового контакта резко снижают трение в контактной паре, поэтому после процесса приработки скорость механического износа резко падает. Так как графит характеризуется наибольшим напряжением дугообразования, скорость электрической эрозии у него минимальна.

В электродвигателях и генераторах коллектор и токосъемные кольца изготавливают из меди и ее сплавов. Однако для контактных колец электрических двигателей и генераторов с плотностью тока под щетками до $(1,5 \div 2,0)10^5$ А/м применяют хромоникелевую нержавеющей сталь (X18H9T) или серый чугун (СЧ18-36).

В нашей стране для электрических машин общего применения выпускается 26 марок щеток, основные параметры которых приведены в табл. 16.10. Первые буквы марок указывают на материал и способ изготовления щеток. ЭГ — электрографи-

Т а б л и ц а 16.10

Физико-механические и коллекторные параметры электрощеток

Марка	Твердость, 10^4 кПа	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Износ на короткозамкнутом коллекторе, мм, не более	Коэффициент трения, не более
Г20	—	35—100	2,0—4,3	0,15	0,22
Г21	19,6—59,0	150—420	3,2—5,5	—	0,22
Г22	16,7—53,9	100—230	2,2	0,30	0,25
Г3	6,9—18,6	8—20	0,6—1,4	0,50	0,30
ЭГ2А	6,9—21,6	11—28	0,9—1,9	0,40	0,23
ЭГ2АФ	4,9—21,6	12—35	1,1—2,1	0,40	0,23
ЭГ4	1,9—6,9	6—16	0,8—2,0	0,60	0,25
ЭГ8	7,8—34,3	30—45	1,0—1,8	0,40	0,25
ЭГ14	7,8—29,4	20—38	1,1—2,1	0,40	0,25
ЭГ51	16,6—53,9	20—40	1,0—2,1	0,40	0,22
ЭГ61	—	24—46	1,2—3,0	0,40	0,17
ЭГ71	5,9—13,7	20—35	1,1—2,1	0,40	0,30
ЭГ74	14,7—49,0	35—75	1,2—2,4	0,40	0,22
ЭГ74АФ	19,6—49,0	19—38	1,0—2,0	0,40	0,22
ЭГ85	16,7—49,0	35—75	1,4—2,8	0,40	0,20
М1	7,8—24,6	2—5	1,0—1,9	0,18	0,25
М3	6,9—17,6	6—12	1,4—2,2	0,15	0,25
М6	9,8—24,6	1—6	1,0—2,0	0,35	0,20
М20	7,8—24,6	3—13	1,0—1,8	0,20	0,26
МГ	3,9—12,7	0,04—0,12	0,3	0,80	0,20
МГ2	3,9—17,6	0,10—0,25	0,6	0,40	0,20
МГ4	9,8—21,6	0,30—1,30	0,6—1,6	0,30	0,20
МГС5	5,9—14,7	2—15	0,7—1,9	0,40	0,22
МГС0	5,9—19,6	Не более 0,30	0,08—0,35	0,60	0,25

тизированные щетки, изготовленные из порошков графита с введением связующего с последующим высокотемпературным обжигом. МГ — металлографитовые щетки, изготовленные из порошков графита с добавлением порошков серебра, олова или свинца.

16.5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕЗИСТОРОВ И ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для эталонных резисторов и резисторов с большой мощностью рассеяния широко используются сплавы высокого сопротивления. Типичным сплавом для изготовления эталонных резисторов является марганец, состоящий из Cu (85%), Mn (12%) и Ni (3%). Этот сплав выпускается двух марок: МНМц3-12 и МНМцАЖ33-12-0,3-0,3. Свое название марганец получил от латинского слова *manganum* (марганец). Вследствие присутствия в сплаве марганца зависимость электрического сопротивления марганца от температуры имеет максимум вблизи комнатных температур и его удельное сопротивление в диапазоне температур от -100 до 100 °С меняется очень мало. Стабильность же свойств марганца во времени достигается путем специальной термической обработки (табл. 16.11).

При изготовлении реостатов и электронагревательных элементов, работающих при температурах, не превышающих 450 °С, используется сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. В рабочем диапазоне температур этот сплав отличается чрезвычайно высокой стабильностью удельного сопротивления, с чем и связано его название — константан. Характерной особенностью этого сплава является высокая термоэлектродвижущая сила в контакте с медью. Это препятствует его использованию в эталонных резисторах, зато позволяет с успехом применять для изготовления термопар, служащих для измерения температур (табл. 16.11).

Для изготовления контактных пружин находят применение нейзильбер. Это медно-никелевый сплав, отличающийся большим содержанием свинца, придающего нейзильберу (после холодной

деформации) достаточно высокую упругость (табл. 16.11).

Для резисторов с большой мощностью рассеяния и электронагревательных элементов применяются нагревостойкие сплавы высокого сопротивления с рабочими температурами, превышающими 1000 °С. Из предназначения сплавов следует, что их ингредиенты подобраны таким образом, чтобы обеспечить высокое значение объемного коэффициента окислации, означающего, что при нагреве на воздухе поверхность сплавов покрывается сплошной оксидной пленкой. Такими ингредиентами являются хром, никель и алюминий, однако в целях снижения стоимости сплавов в их состав часто вводят железо. С малым содержанием железа сплавы Fe-Ni-Cr называют нихромами, а с повышенным — ферронихромами. Сплавы Fe-Cr-Al называют соответственно фехралями и хромалями. Основные сведения о составах, областях применения и свойствах сплавов приведены в табл. 16.12 — 16.15.

Карбиды и силициды широко используются для изготовления электронагревательных элементов высокотемпературных нагревателей (табл. 16.16). Из этих материалов наибольшее распространение получили силит и глобар. Эти материалы изготавливаются на основе карбида кремния, и их максимальная рабочая температура 1450 °С.

При эксплуатации силитовых и глобаровых электронагревательных элементов необходимо учитывать критичность срока службы по отношению к температуре перегрева: даже при небольшом превышении температуры над максимально допустимой срок службы элементов резко уменьшается. До температуры 900 °С ТКС нагревателей отрицателен, и при достижении этой температуры сопротивление элементов уменьшается приблизительно в 5 раз. Однако при температуре 1400 °С их сопротивление уже на 20% превышает максимальное.

Более высокие рабочие температуры имеют нагревательные элементы на основе дисилицида молибдена, стержни из которого допускают нагрев до 1700 °С.

Т а б л и ц а 16.11

Свойства медно-никелевых сплавов

Параметры	Марганцин МНМц3-12 и МНМцАЖ33-12-0,3-0,3	Константан МНМц40-1,5	Нейзильбер МНц15-20
Плотность при $T = 20$ °С, кг·м ⁻³	8400	8900	8700
Температура плавления, °С	960	1260	1080
Максимальная рабочая температура, °С	60 (в приборах)	500	200—250
Удельное электрическое сопротивление при $T = 20$ °С, мкОм·м	0,42—0,53	0,45—0,52	0,30—0,32
Температурный коэффициент удельного сопротивления, °С ⁻¹	$-(2 \div 25) \cdot 10^{-6}$ при 10—40 °С	$-(2 \div 6) \cdot 10^{-5}$ при 20—100 °С	$36 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент линейного расширения при $T = 20 \div 100$ °С, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	18	14,4	16,6
Удельная термоЭДС в паре с медью при $T = 0 \div 100$ °С, мкВ/°С	0,9—1	42,8	14,4
Удельная термоЭДС в паре с железом при $T = 0 \div 100$ °С, мкВ/°С	—	54	—

Т а б л и ц а 16.12

Марки и химический состав сплавов высокого электрического сопротивления

Марка	Химический состав, %									Добавочные примеси, %
	С	Мп	Si	Cr	Ni	Al	Fe	S	P	
	Не более							Не более		
X13Ю4	0,15	0,7	1,0	12,0—15,0	0,6	3,5—5,5	Остальное	0,025	0,035	—
X23Ю5	0,06	0,5	0,7	21,5—24,5	0,6	4,5—5,5	«	0,020	0,025	—
X23Ю5Т	0,05	0,3	0,6	21,5—23,5	0,6	4,6—5,3	«	0,015	0,020	—
X27Ю5Т	0,05	0,3	0,6	26,0—28,0	0,6	5,0—5,8	«	0,015	0,020	—
X25Н20	0,15	2,0	1,0	24,0—27,0	17,0—20,0	—	«	0,020	0,030	—
X15Н60	0,15	1,5	0,4—1,5	15,0—18,0	55,0—61,0	0,2	«	0,020	0,030	—
X15Н60-Н	0,10	0,6	1,0—1,5	15,0—18,0	55,0—61,0	0,2	«	0,020	0,030	—
X20Н80	0,15	0,7	0,4—1,5	20,0—23,0	Остальное	0,2	1,5	0,020	0,030	—
X20Н80-Н	0,10	0,6	1,0—1,5	20,0—23,0	«	0,2	1,2	0,020	0,030	—
XН60Ю	0,10	0,3	0,8	15,0—18,0	55,0-58,0	2,6—3,5	Остальное	0,020	0,020	Барий 0,10; церий 0,03
XН70Ю	0,10	0,3	0,8	26,0—29,0	Остальное	2,8—3,5	1,0	0,012	0,015	Барий 1,10; церий 0,03
XН77ТЮР	0,07	0,3	0,6	19,0—22,0	«	0,6—1,0	4,0	0,007	0,015	Титан 2,4—2,8; бор 0,01; церий 0,02

Т а б л и ц а 16.13

Основные свойства и области применения сплавов высокого сопротивления

Марка	Характеристика окалиностойкости и жаропрочности	Преимущественные области применения
X13Ю4, X15Ю5	Окалиностойки в окислительной атмосфере и в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; склонны к провисанию при высоких температурах	Проволока и лента для реостатов, нагреваемых элементов, бытовых приборов и аппаратов
X23Ю5Т		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, бытовых приборов и аппаратов, реостатов и др.
X27Ю5Т		Проволока и лента для высокотемпературных промышленных и лабораторных печей
X25Н20	Окалиностойки в окислительной атмосфере, водороде, вакууме; неустойчивы в атмосфере, содержащей серу и сернистые соединения; более жаропрочны, чем хромоалюминиевые сплавы	Проволока для промышленных и бытовых печей, бытовых приборов
X15Н60		Проволока и лента для промышленных электрических аппаратов теплового действия, реостатов и бытовых приборов
X15Н60-Н		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов
X20Н80		Проволока и лента для промышленных электрических аппаратов теплового действия, реостатов, резисторов, микропроводов и бытовых приборов
X20Н80-Н		Проволока и лента для промышленных и лабораторных печей, электрических аппаратов теплового действия и бытовых приборов

Т а б л и ц а 16.14

Основные характеристики сплавов высокого сопротивления

Марка	Удельное сопротивление при $T = 20^\circ\text{C}$, $\text{мкОм} \cdot \text{м}$	Рабочая температура, $^\circ\text{C}$	Окружающая среда
ХН60Ю	1,209	1100—1200	Воздух, вакуум, защитная среда в отсутствие сернистых соединений
ХН70Ю	1,338	1100—1200	
ХН77ТЮР	1,270	1000—1100	Вакуум, защитные среды в отсутствие сернистых соединений

Т а б л и ц а 16.15

Физические свойства сплавов с высоким электрическим сопротивлением

Параметры	X13Ю4	X15Ю5	X23Ю5	X23Ю5Т	X27Ю5Т	X15Н60, X15Н60-Н	X20Н80, X20Н80-Н	ХН70Ю
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	7300	7280	7250	7210	7190	8200	8400	7900
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	1500	1500	1500	1500	1500	1390	1400	1390
Структура	—	—	Ферритная	—	—	—	Аустенитная	—
Магнитность	—	—	Магнитная	—	—	—	Немагнитная	—
Число Бринелля	140—200	150—200	180—250	200—250	200—250	140—150	140—150	—
Температурный коэффициент линейного расширения при $T = 20 \div 1000^\circ\text{C}$, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	15	16	15	15	15	17	18	21
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	12,6	16,8	12,6
Теплоемкость, $10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,462	0,504	0,462

Т а б л и ц а 16.16

Физические свойства карбидов [16.1]

Свойства	Карбид	Температура, °C								
		20	600	1000	1400	1800	2000	2200	2400	2600
Удельное сопротивление, мкОм · м	ZrC	0,50	1,04	1,38	1,74	2,1	2,28	2,46	2,64	2,82
	NbC	0,51	0,74	0,90	1,06	1,22	1,3	1,38	1,46	—
	TaC	—	—	0,88	1,15	1,5	1,65	1,8	2,0	—
	HfC	—	—	1,04	1,35	1,6	1,78	1,9	2,1	2,26
Удельная теплоемкость, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	ZrC	380	525	565	600	640	658	678	695	715
	NbC	352	478	515	543	574	585	600	612	624
	TaC	190	270	295	320	348	358	370	380	390
	HfC	180	280	283	298	308	315	320	325	330
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	ZrC	6,7	6,8	7,0	7,4	7,9	8,2	8,6	9,1	9,3
	NbC	6,5—7,3	6,7	6,9	6,9	7,4	7,6	7,7	7,8	7,9
	TaC	4,1—8,0	6,4	6,6	6,9	7,6	8,0	8,1	8,3	8,6
	HfC	5,0—6,6	6,6	6,7	7,0	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9
Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · К)	ZrC	—	—	13	21	26	28	31	33	36
	NbC	—	—	31	23	19	15	14	13	12
	TaC	—	—	11	18	23	26	29	31	24
	HfC	—	—	9	13	19	21	23	25	27
Спектральный коэффициент для длины волны 0,65 мкм	ZrC	—	—	0,6—0,8	0,6—0,8	0,6—0,8	0,6—0,8	0,5—0,8	0,5—0,6	0,5—0,6
	NbC	—	—	0,66	0,65	0,63	0,62	0,61	0,61	0,6
	TaC	—	—	0,4—0,8	0,4—0,8	0,4—0,8	0,4—0,8	0,4—0,7	0,4—0,6	0,4—0,5
	HfC	—	—	0,72	0,7	0,68	0,65	0,63	0,61	0,6
Интегральный коэффициент теплового излучения	ZrC	—	—	0,5—0,8	0,4—0,8	0,4—0,8	0,5—0,8	0,5—0,8	0,5—0,7	0,5—0,6
	NbC	—	—	0,4	0,42	0,44	0,45	0,46	0,48	0,5
	TaC	—	—	0,45	0,47	0,47	0,49	0,5	0,5	0,51
	HfC	—	—	0,4	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48

Свойства дилицида молибдена

Удельное сопротивление, мкОм · м:	
при 20 °С	0,2
при 1600 °С	0,8
Температурный коэффициент линейного расширения при 20 — 1000 °С, К ⁻¹	82,5
Работа выхода электронов при 1400 К, эВ	3,3
Коэффициент теплопроводности при 40 °С, Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	51,8
Микротвердость, ГПа	11,5
Модуль Юнга, ГПа	44,1
Модуль сдвига, ГПа	1,4
Максимальная рабочая температура, °С, стержней из дилицида молибдена в различных газовых средах:	
инертные газы	1650
кислород	1700
азот	1500
оксид азота	1650
оксид углерода	1500
водород	1400

16.6. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Некоторые металлы обладают замечательными свойствами: при охлаждении их электросопротивление понижается обычным образом, но при достижении некоторой температуры это сопротивление исчезает полностью. Тогда говорят, что произошел переход в сверхпроводящее состояние. Температура, при которой сверхпроводник теряет сопротивление, называется его критической температурой (рис. 16.1).

Применение сверхпроводников открывает пути улучшения технических и экономических параметров современных приборов и устройств или дает принципиально новые решения проблем, которые не могут быть реализованы с помощью обычной техники.

Одна из первых и наиболее освоенных областей применения сверхпроводников — создание высоких магнитных полей, вплоть до 20 кА/м. Такие поля используются в физике плазмы, физике высоких энергий, ядерной физике (ускорители), в

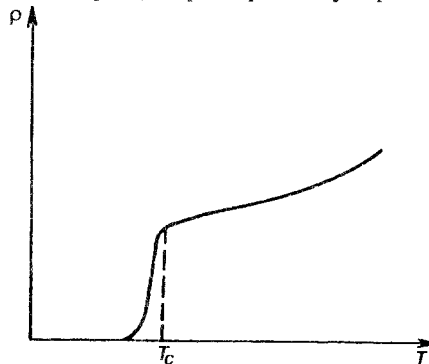


Рис. 16.1. Температурная зависимость сопротивления сверхпроводника

накопителях энергии, при создании скоростного транспорта на магнитной подушке.

Использование сверхпроводников в энергетике и электротехнике позволит резко сократить потери электроэнергии. На основе сверхпроводников можно создавать электродвигатели и генераторы с высокими КПД и другими улучшенными рабочими характеристиками, сверхбыстродействующие ЭВМ.

Явление сверхпроводимости было открыто Камерлинг Оппенсом. Первый сверхпроводник — ртуть терял свое сопротивление при охлаждении его до 4 К (–269 °С). Развитие исследований в области материаловедения, физикохимии и металлофизики сверхпроводящих материалов, совершенствование методов изготовления высокочистых металлических веществ, а также техники измерения критических параметров привело к открытию большого числа новых сверхпроводников. Сверхпроводящими свойствами могут обладать металлы, сплавы и металлические соединения, а также неметаллические химические вещества в металлическом состоянии, органические соединения и ионные кристаллы.

Чистые элементы, обладающие сверхпроводимостью, можно классифицировать по следующим группам:

1) непереходные металлы Si, Ge, As, Sb, Bi, Se, Te, которые обладают сверхпроводимостью при высоком давлении;

2) переходные металлы групп 3d, 4d и 5d, у которых с увеличением порядкового номера происходит заполнение внутренних уровней;

3) тонкопленочные структуры на основе Li, Cs, Gr, Pr, Nd, Eu. Критическая температура чистых элементов не превышает 10 К.

При сплавлении чистых элементов возможно образование твердых растворов и упорядоченных сплавов типа интерметаллических соединений. Наиболее высокая температура сверхпроводящего перехода для этой группы материалов была обнаружена в интерметаллическом соединении Nb₃Ge (23,3 К). В табл. 16.17 приведены значения критических температур наиболее технологичных сплавов.

Т а б л и ц а 16.17

Свойства сверхпроводящих сплавов

Соединения	Симметрия	T _c , К
Nb _{0,75} Zn _{0,25}	Кубическая	11,0
Nb _{0,75} Ti _{0,25}	»	10,0
Nb ₃ Sn	»	18,5
V ₃ Ga	»	16,8—14,2
(Hf _{0,5} Zr _{0,5})V ₂	»	10,1
ZrRe	Гексагональная	6,4
VRu	Кубическая	5,0
NbTe ₃	»	10,5
Pb ₃ Sr ₅	Гексагональная	4,6
RhZr ₃	Кубическая	11
NbRu ₃	»	15—16

Сверхпроводящее состояние может разрушаться не только при повышении температуры материала до T_c , но и при определенных (критических) значениях плотности электрического тока J_c и напряженности магнитного поля H_c . Поэтому, рассматривая приведенные сплавы с точки зрения практического применения их в энергетике и электромеханике, следует оценивать их по критической температуре перехода, плотности тока при воздействии магнитного поля.

Выпускаемый промышленностью ниобий в виде проволоки, прутков и полос с примесью Ta (0,2%), C (0,01%), N_2 (0,01%), W и Mo (0,02%) обладает критической плотностью тока $J_c = 8 \cdot 10^8$ А/м² при воздействии магнитного поля индукцией 0,5 Тл.

Молибден-ренийевые сплавы, изготовленные в виде тонкой проволоки диаметром 0,01 мм позволили получить плотность тока $J_c = 10^8$ А/м² в магнитном поле индукции 1,5 Тл. Ниобий-титановые сплавы по сравнению с Mo-Re обладают более высокими значениями плотности тока в аналогичных условиях. Для проволоки состава Ti — 20 % Nb при $T = 4,2$ К значение $J_c = 10^9$ А/м² при индукции магнитного поля 3 Тл и $J_c = 10^7$ А/м² при индукции магнитного поля 7 Тл.

Сплавы Nb_3Sn в виде сверхпроводников применяются путем осаждения олова слоем толщиной 20—50 мкм на провод из ниобия или ленты из нержавеющей стали толщиной 20—50 мкм и шунтирующего слоя 25—50 мкм из меди. Критическая плотность тока такой ленты при индукции 10 Тл и температуре 4,2 К составляет $(2 \div 2,7) \times 10^8$ А/м².

В 1986 г. Беднорцем и Мюллером была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в системе Ba—La—Cu—O при температуре 30—35 К.

В системе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ была достигнута критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_c = 92$ К. Таким образом был преодолен азотный барьер, что позволило использовать для охлаждения керамического образца жидкий азот ($T_{кип} = 77$ К) вместо дорогостоящего гелия.

По данным рентгеновских измерений было установлено, что соединение $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ имеет ромбическую элементарную ячейку. В результате поисков новых высокотемпературных сверхпроводников в рамках той же самой ромбической структуры была обнаружена большая группа металлоксидных соединений, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью с $T_c = 10^2$ К. В этих соединениях иттрий заменялся редкоземельными элементами.

Попытки замены части кислорода галогенами не дали воспроизводимых результатов. Хотя в некоторых работах указывалось на достижение критических температур выше 100 К во фторированных металлоксидных соединениях, но отмечалась ненадежность результатов многих экспериментов в этой области.

Исследования влияния индукции магнитного поля на сверхпроводящее состояние керамического образца показали существование двух видов сверх-

проводников. В одном случае при достижении критического значения напряженности внешнего магнитного поля H_c сверхпроводящее состояние разрушается. В другом случае при достижении напряженности магнитного поля H_{c1} магнитный поток проникает в сверхпроводник, но нормальное состояние его полностью не восстанавливается до тех пор, пока напряженность не достигнет H_{c2} .

Область между H_{c1} и H_{c2} называется смешанным состоянием. Сверхпроводники, на кривых намагничивания которых имеется область смешанного состояния, называют сверхпроводниками II рода.

Зависимость намагничивания образца от напряженности внешнего магнитного поля для сверхпроводников приведена на рис. 16.2.

Для сверхпроводников II рода, которые неоднородны уже потому, что содержат включения другой фазы, кривые намагничивания насыщения необратимы. При увеличении напряженности внешнего магнитного поля намагничивание насыщения образца изменяется в соответствии с кривой 1, а при уменьшении — по кривой 2. В этом случае значение поля H_{c1} четко определить нельзя, но поле H_{c2} остается вполне определенным (рис. 16.3).

Необратимость кривых намагничивания связана с пиннинг удержанием линий магнитного потока структурных дефектов. Проникая в сверхпроводник II рода, находящийся в смешанном состоянии магнитный поток образует решетку из квантовых линий потока.

Каждая такая линия несет магнитный поток $h/2e = 2,07 \cdot 10^{-7}$ Гс·см². При этом поток не

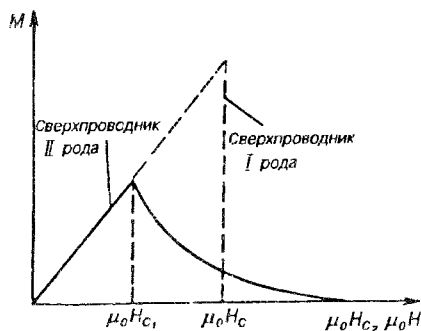


Рис. 16.2. Зависимость намагничивания образца от напряженности внешнего магнитного поля

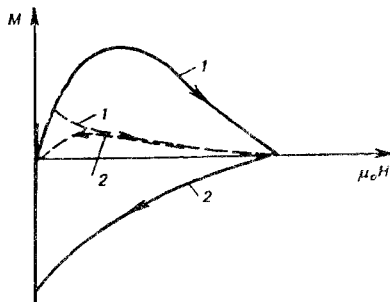


Рис. 16.3. Кривые намагничивания сверхпроводника II рода

проникает глубоко в сверхпроводящий материал, так как в плоскостях, перпендикулярных нитям проводимости, вокруг оси нити циркулируют сверхпроводящие пары.

Магнитный поток и токи, связанные с вихревой нитью, простираются на расстоянии порядка λ_0 . Поэтому лишь при $l < \lambda_0$ существует взаимодействие между ними. Когда напряженность магнитного поля возрастает до H_{c1} , становится энергетически выгодным образование вихревых нитей, их плотность может почти немедленно достигнуть значения, соответствующего расположению нитей на расстоянии порядка λ_0 друг от друга без появления энергии взаимодействия. Появляется резкое падение намагниченности в точке H_{c1} . По мере увеличения напряженности магнитного поля $H_c > H_{c1}$ образуется все больше вихревых нитей, пока при H_c вблизи H_{c2} расстояние между ними не станет

$$2\sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_0}{\chi}} = \xi,$$

где $\chi = \sqrt{2} \frac{H}{H_c} (n + 1/2)$; $n = 0, 1, 2 \dots$ —

параметр Ландау.

Максимальный ток, который может протекать по массивному сверхпроводнику без возникновения сопротивления, называется критическим током данного сверхпроводника.

Известно [16.5], что все токи в сверхпроводнике протекают вблизи поверхности в тонком слое, равном глубине проникновения магнитного потока, причем плотность тока уменьшается от некоторого значения J_c на самой поверхности. Когда плотность сверхпроводящего тока превышает J_c , сверхпроводимость разрушается.

Следует отметить, что в образце сверхпроводника, помещенного во внешнее магнитное поле течет ток с плотностью J_i и циркулируют экранирующие токи с плотностью J_H , стремящиеся уничтожить магнитный поток внутри образца. Тогда для каждой точки поверхности можно записать

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \vec{J}_H.$$

При повышении J до значения критической плотности тока J_c сверхпроводимость разрушается. Сопротивление в сверхпроводнике возникает, когда в любой точке поверхности полная напряженность магнитного поля, обусловленного током и приложенным полем, превышает напряженность критического поля H_c .

При отсутствии внешнего магнитного поля критическим будет ток, создающий на поверхности проводника магнитное поле напряженностью H_c .

Так как напряженность критического магнитного поля уменьшается с повышением температуры и достигает нуля при температуре перехода T_c , то плотность критического тока имеет такую же зависимость от температуры. Можно заключить, что если по сверхпроводнику протекает ток, то температура его сверхпроводящего перехода понижается.

Определим значение критической плотности тока для цилиндрического сверхпроводника в от-

сутствие внешних магнитных полей. Ток, протекающий по проводнику, вызывает на его поверхности поле, напряженность которого определяется из соотношения

$$2\pi a H_J = J,$$

где H_J — поле, индуцированное током J ; a — постоянная.

Для критических условий

$$2\pi a H_c = J_c.$$

Для свинцовой проволоки диаметром 1 мм при температуре жидкого гелия напряженность критического поля равна $4,4 \cdot 10^4$ А/м, а критический ток (без внешнего магнитного поля) равен 140 А. При воздействии магнитного поля H на цилиндрический проводник, по которому протекает ток плотностью J , векторы внешнего и индуцированного тока магнитных полей складываются. Так как они ортогональны, то напряженность результирующего поля на поверхности проводника

$$H = (H_c^2 + H_J^2)^{1/2} = (H_c^2 + J^2 / 4\pi^2 a^2)^{1/2}.$$

Критическое значение тока будет достигнуто при следующем соотношении напряженностей критического и внешних полей

$$H_c^2 = H^2 + J_c^2 / 4\pi^2 a^2.$$

При такой интерпретации напряженность H параллельна оси цилиндрического сверхпроводника, плотность магнитного потока на поверхности однородна и линии магнитного потока располагаются по спирали.

Если приложенное магнитное поле напряженностью H перпендикулярно оси сверхпроводника, то плотность суммарного потока на поверхности неоднородна. По одну сторону сверхпроводника плотности магнитных потоков складываются, а по другую вычитаются. Максимальное значение напряженности магнитного поля определяется по кольцевому контуру, проходящему по поверхности сверхпроводника.

В этом случае вследствие размагничивания напряженность магнитного поля $2H$ складывается с напряженностью H_J и полное значение поля будет равно

$$\sum H = 2H_c + H_J = 2H_c + J / 2\pi a, \quad (16.1)$$

где a — параметр, характеризующий поле.

При достижении H значения H_c в какой-либо части поверхности сверхпроводника, в нем возникает сопротивление. Из (16.1) видно, что плотность критического тока в этом случае равна:

$$J_c = 2\pi a (H_c - 2H). \quad (16.2)$$

Как видим, (16.2) представляет линейную зависимость J_c от H .

В сверхпроводниках II рода ситуация с критическими токами усложняется, поскольку изменение состояния материала происходит дважды — при напряженности поля H_{c1} и H_{c2} .

Можно утверждать, что при значениях $H < H_{c1}$ критические токи в сверхпроводниках II рода будут определяться теми же условиями, что и в сверхпро-

водниках I рода. Эксперименты показывают, что это справедливо для идеальных образцов. Если поле приложено под прямым углом к проволоке из чистого сверхпроводника II рода, то критический ток в сверхпроводнике уменьшается линейно с повышением напряженности магнитного поля. Критический ток не снижается до нуля при напряженности, равной $1/2 H_{c1}$, а при напряженности выше H_{c1} в сверхпроводнике II рода протекает некоторый ток без сопротивления.

Структура материалов высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Многие из новых высокотемпературных сверхпроводников относятся к классу керамических материалов, называемых перовскитами. Их структура легко поддается изменениям, что позволяет получить материалы, обладающие широким разнообразием электрических свойств.

Идеальная структура перовскитов, которые описываются общей формулой ABX_3 , — кубическая. Каждый куб состоит из трех различных химических элементов (A , B и X) (рис. 16.4) в отношении 1:1:3. A и B — это металлические катионы (ионы с положительным зарядом), X — неметаллические анионы (ионы с отрицательным зарядом); A — наиболее крупный из двух металлических катионов, расположен в центре каждого куба, катионы B занимают вершины восьми углов, а анионы X находятся в середине 12 ребер кубов. Можно предположить, что такой перовскит (разновидность титана кальция CaTiO_3 , образующаяся при высоких температурах) имеет идеальную структуру. Его элементарная ячейка, или основной строительный блок, представляет собой простой куб. Атом кальция в положении A больше, чем атом титана в положении B , а кислород занимает все 12 положений X .

Такой кристалл часто имеет форму куба или октаэдра, отражающую симметрию атомной структуры.

Множество химических элементов может соединяться и образовывать сотни идеальных и модифицированных перовскитов, хорошо известных в настоящее время. Барий, калий и редкоземельные элементы (элементы от церия до лютеция с атомными номерами от 58 до 71 в периодической таблице) — наиболее типичные из 24 элементов, которые могут занимать положение A . Почти 50

различных элементов могут находиться в положении B . Положения X могут быть заняты не только кислородом, но и неметаллами группы галогенов: фтором, хлором, бромом. Среди десятков соединений, соответствующих идеальной структуре перовскита, существуют такие, как фторид серебра и цинка AgZnF_3 , бромид цезия и кадмия CsCdBr_3 , фторид лития и бария LiBaF_3 .

У многих перовскитов идеальная структура частично искажена, поскольку число центральных A -катионов меньше числа B -катионов, расположенных в вершинах углов куба. Это неравенство приводит к тому, что X -атомы, а иногда и B -атомы смещаются из своих положений. Часто кристаллографы объясняют подобные смещения, полагая, что идеальной элементарной ячейкой перовскитов является не простой куб, а кластер из многогранников (полиэдров). Каждый B -катион, занимающий вершины углов соседних кубов, связан с окружающими его шестью анионами (по одному от каждого из шести ребер куба, сходящихся в вершине данного куба). Анионы образуют вершины октаэдра. A -катион по-прежнему расположен в центре куба, но теперь мы рассматриваем его в окружении восьми октаэдров, каждый из которых содержит в центре B -катион. Когда число A -катионов меньше числа B -катионов, октаэдры, оси которых параллельны в идеальном перовските, отклоняются от вертикального положения и поворачиваются, т.е. октаэдра как бы разворачиваются, каркас сжимается вокруг A -катионов, что приводит к снижению симметрии и потенциальному изменению оптических, упругих, электрических и других свойств перовскитов. На сегодняшний день известно множество перовскитов с развернутыми октаэдрами.

В перовскитах с развернутыми октаэдрами, как и в идеальной модели, B -катионы могут оставаться в центре октаэдров. Однако в некоторых перовскитах они слегка смещаются. Подобное «смещение с центра» октаэдра положительно заряженных катионов может привести к электрической поляризации перовскитов. Кроме того, направление смещения с центра может легко изменяться под воздействием электрического поля. Поляризованные материалы, способные менять полярность под воздействием электрического поля, называют сегнетоэлектриками, они широко применяются в электронике.

Перовскиты, имеющие смещенные с центра катионы или развернутые октаэдры, часто соответствуют простой формуле ABX_3 . Однако и эти и другие перовскиты могут отклоняться от идеального состава: их положения A и B могут быть заняты катионами двух и более типов. В оксиде кальция и урана Ca_2CaUO_6 , например, атомы кальция занимают все возможные положения A , но октаэдрическое положение B в равной степени может быть занято как ионами кальция, так и ионами урана. B -катионы «упорядочивают» (определенным образом чередуются) структуру, которая является структурой с развернутыми октаэдрами, поскольку ионов кальция в положениях B значительно больше, чем ионов урана.

Октаэдрические центры могут быть заняты не

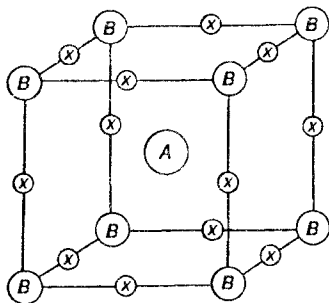


Рис. 16.4. Кристаллическая структура перовскита

только двумя разными элементами, но и различными ионами одного элемента. Оксид бария и висмута — полупроводник, который иногда описывают формулой BaBiO_3 , подобен перовскитам «со смешанной валентностью». Он имеет два различных катиона висмута — один с тремя валентными электронами (которые находятся на внешних, наиболее удаленных от ядра атома орбиталях), а другой — с пятью. Поэтому обычно используют формулу $\text{Ba}_2^{2+}\text{Bi}^{3+}\text{Bi}^{5+}\text{O}_6$. Точно так же, как и в оксиде кальция урана, в этом соединении октаэдры, содержащие два типа катионов, чередуются по всему кристаллу.

Не имеет значения, каким образом происходит искажение структуры или изменение состава — все описанные выше перовскиты являются стехиометрическими: у них на каждые три аниона приходится по два катиона. Множество других перовскитов или структур, родственных им, не являются стехиометрическими, имея вакантные положения, они отклоняются от идеальной формулы ABX_3 .

Ряд соединений, начиная с перовскита CaTiO_3 и кончая ферритом кальция $\text{CaFeO}_{2,5}$ — соединением с низким содержанием кислорода, хорошо иллюстрирует структурные изменения, связанные с отсутствием (дефицитом) атомов в кристаллической структуре. В соединениях с низким содержанием кислорода недостаток кислорода приводит к образованию слоев, состоящих из *B*-катионов, связанных с четырьмя атомами кислорода, а не шестью, как обычно. Эти слои чередуются со слоями обычных октаэдров. Монолитный кристалл неоднороден: он растет плоскими пластинчатыми кристалликами, что отражает слоистую атомную структуру.

Такие особенности структуры, как нестехиометрия, разворот октаэдров, смещение с центров октаэдров катионов, а также замещение катионов, в совокупности могут создавать почти любую комбинацию. Многообразие структур перовскитов кажется неограниченным, но и эта картина является неполной. В однородном перовските, даже из кристалла с развернутыми октаэдрами или чередующимися катионами, можно теоретически предсказать порядок расположения атомов одной его части, анализируя другую часть. На самом деле большинство перовскитов, подобно кристаллам других типов, неоднородны: они насыщены микродефектами, беспорядочными нарушениями кристаллической структуры, которые нельзя предсказать. Среди множества таких микродефектов можно выделить дефекты упаковки, аномально развернутый полиэдр, нарушения периодичности в расположении катионов и точечных дефектов (которые происходят, когда один атом отсутствует или замещается атомом другого элемента).

Получение тройных и многокомпонентных металлооксидных соединений осуществляется практически всеми методами синтеза неорганических материалов, однако наиболее распространены следующие: твердофазный синтез и метод совместного

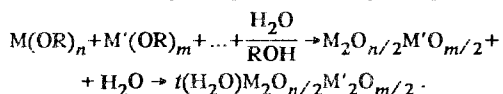
осаждения компонентов из растворов последующим отжигом.

В твердофазном синтезе, заключающемся в высокотемпературном нагревании механической смеси, в качестве исходных реагентов используются термически нестойкие соединения соответствующих металлов. Поскольку скорость процесса твердофазных реакций в основном зависит от фазового состава исходной смеси, то последними определяются температура и продолжительность прокаливания шихты. Метод твердофазных реакций является простым и удобным, а процесс синтеза можно проводить в широком температурном интервале. К недостаткам этого метода можно отнести: неоднородность получаемого материала; недостаточную чистоту продукта; невысокую стехиометричность конечного продукта; сравнительно высокие температуры синтеза. Для этого метода характерна также длительность технологического процесса, которая для достижения гомогенности и полноты взаимодействия достигает нескольких дней.

Вышеуказанных недостатков не имеет метод совместного осаждения компонентов из растворов. Этот метод позволяет значительно (на 300 — 500 °C) снизить температуру синтеза.

Широкое применение нашел вариант синтеза, при котором осаждение производят в виде гидроксидов при воздействии аммиака на соли металла, соединение которого надо получить. Далее осадок подвергают нагреванию до температуры кристаллизации соответствующего соединения.

В основе метода лежит гидролитическое разложение растворов алкоколятов одного или нескольких металлов в среде органического растворителя



Этот метод находит применение в синтезе высокочистых и гомогенных материалов различного функционального значения.

Для получения стехиометрических составов Y-Ba-Cu-O обычно используется метод твердофазного синтеза.

Исходными веществами служат: оксид иттрия с содержанием основного вещества более 99,9%, карбонат бария, оксид меди, хлорид бария и фторид бария квалификации «х.ч.»

Для удаления кристаллизационной и абсорбционной воды при создании стехиометрических составов исходные оксиды термически обрабатываются при 400 — 600 К в течение 1 — 1,5 ч. Гомогенизацию исходных составов проводят в суспензированном состоянии (с дистиллированной водой) в керамической ступке в течение 2 ч. После механического перемешивания составы подвергаются термообработке при 50 — 100 °C в течение 1 ч для просушивания. Затем смесь прессуется в виде таблеток и стержней и отжигается при соответствующих режимах.

Смесь порошков соответствующих оксидов, например, для лантанстронциевого керамического

материала спекалась для проведения твердофазной реакции на воздухе при $T = 1000 \div 1100^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов. Затем полученный материал спрессовывается в таблетки для дальнейших исследований. Для приготовления керамического образца состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ используются порошки Y_2O_3 , BaCO_3 и CuO . Механическая смесь данных порошков, взятых в количествах, необходимых для выполнения условий стехиометрии, прокаливается при $T = 900 \div 950^\circ\text{C}$ в течение 8 — 9 ч, полученный материал далее снова размалывался, а затем отжигался при $T = 850 \div 875^\circ\text{C}$ в течение 10 ч на воздухе.

Для приготовления керамических материалов 2212 висмутовой системы используются порошкообразные Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 и CuO повышенной чистоты. Исходные компоненты перемешивались в шаровой мельнице, а затем прокаливались при $T = 850 \div 1050^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов. Полученные материалы снова перемешивались и отжигались при $T = 850 \div 900^\circ\text{C}$.

Для получения ВТСП керамических материалов на основе висмута проводится двухстадийная твердофазная реакция: сначала при повышенной температуре синтезировали систему Sr-Ca-Cu-O (из тугоплавких исходных компонентов), а затем проводят реакцию с оксидом висмута, температура плавления которого составляет 817°C . Так, для системы 2212 использовались порошки SrCO_3 , CaCO_3 и CuO в пропорции, отвечающей отношению катионов $\text{Sr:Ca:Cu} = 2:1:2$. Смесь порошков тщательно перемешивалась и спрессовалась в таблетку, которую спекали при $T = 950^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. Остывшую таблетку растирали в порошок, добавляли требуемое количество Bi_2O_3 и хорошо перемешивали. Затем прессовали таблетку и спекали ее при 850°C в течение 5 ч с последующей закалкой на воздухе. Такая методика удобна тем, что позволяет получить конечный продукт за относительно короткое время и с хорошей воспроизводимостью.

Эксперименты [16.12] свидетельствуют о сильном влиянии содержания кислорода на электросопротивление и критическую температуру сверхпроводников ВТСП. Нарушение кислородной стехиометрии ведет к деградации сверхпроводящих свойств.

В [16.10] исследовано влияние атмосферы отжига на свойства системы Bi-Sr-Ca-Cu-O . Образец был приготовлен по методу твердофазной реакции. Смесь порошков прокаливалась при $T = 800^\circ\text{C}$ в течение 5 ч на воздухе. Прокаленный порошок перемалывался, гранулировался и спрессовывался в таблетки. Полученные образцы отжигались при температуре от 800 до 900°C в течение 5 ч в атмосфере азота (с концентрацией кислорода не более 0,003%), кислорода и на воздухе. Результаты исследований показали, что образование сверхпроводящей фазы интенсивнее происходит при более высоких температурах в атмосфере кислорода.

Для иттриевых образцов типа 1-2-3 закалывание приводит к снижению температуры сверхпроводящего перехода T_c или полному исчезновению

сверхпроводящих свойств. Эти эффекты обусловлены высокой подвижностью атомов кислорода в медь-кислородных цепочках: резкое охлаждение образцов иттриевой керамики приводит к фиксации низкой, равновесной для высоких температур, концентрации кислорода. В [16.12] исследовалось влияние закалки на сверхпроводящие свойства висмутовых образцов состава A (4-3-3-4); B (1-1-1-2); C (2-2-3-4) и D (2-3-3-5). Образцы изготавливались по обычной керамической технологии. Закалывание проводилось при температуре $780 - 890^\circ\text{C}$ в жидком азоте. Установлено, что при закалывании образцов из висмутовых керамических материалов наблюдаются эффекты двух типов:

а) для образцов составов B , C , D происходит увеличение T_c на 15 — 20 К без заметного расширения области перехода в сверхпроводящее состояние;

б) для образца состава A наблюдается расширение области ВТСП перехода, при этом T_c не увеличивается, что объясняется эффектами близости, связанными с увеличением дисперсности образцов. Увеличение же T_c вызывается изменением локальной концентрации кислорода, которая возникает при закалывании в связи с появлением аморфной фазы.

Ниже даны параметры некоторых объемных высокотемпературных сверхпроводников.

Состав исходного керамического материала:	T_c , К
$\text{Y}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	91
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,81}$	92,5
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	92
$\text{YBa}_{0,95}\text{La}_{0,05}\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	92,7
$\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	93
$\text{Bi}_2\text{Sr}_1\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$	78—101
$\text{Bi}_5\text{Sr}_4\text{Ca}_1\text{Cu}_{10}\text{O}_8$	79—104

Получение высокотемпературных сверхпроводимых пленок. Один из способов получения ВТСП пленок заключается в лазерном испарении исходного ВТСП материала и осаждении продуктов испарения на соответствующие подложки. Качество напыления пленок зависит при этом от многих условий, в частности от параметров лазерного излучателя, режима отжига, материала подложки и ее температуры. Пленки, напыленные в вакууме, как правило, имеют низкое значение J_c из-за потери кислорода, и для повышения температуры перехода требуется длительный последующий отжиг в атмосфере кислорода, что в свою очередь отрицательно влияет на качество пленок. Поэтому целесообразно производить напыление в вакуумных камерах при небольшом давлении кислорода. Метод является перспективным в микроэлектронике, наряду с такими, как катодное и магнетронное распыление.

В данной технологии смесь иттрия, бария и меди, нанесенная на подложку, обрабатывается кислородом при температуре 560°C . В результате на подложке образуется слой соединения иттрия, бария, меди и кислорода толщиной 700 нм. Важной особенностью этой технологии следует считать

отсутствие отжига, который проводится обычно при температуре 900 °С и приводит к образованию зерен размером 1 мкм, что резко ухудшает качество ВТСП пленки. Поверхность образцов, полученных данным методом, близка по качеству к полупроводниковым, что делает их перспективными для создания микросхем. Поскольку тонким ВТСП пленкам свойственна химическая неустойчивость (молекулы бария взаимодействуют с парами воды и воздуха), для повышения стабильности их покрывают слоем оксида серебра.

На рис. 16.5 приведена зависимость критической температуры перехода от температуры отжига для иттриевого образца. Из рисунка видно, что существует довольно узкий диапазон температуры обжига, при котором значение критической температуры максимально.

При измерении магнитной восприимчивости синтезированных ВТСП материалов наблюдаются эффекты, связанные со слоистой структурой керамических материалов. В качестве примера на рис. 16.6 приведена зависимость $\chi''(T)$, которая имеет два максимума. Более высокотемпературный максимум появляется при переходе зерен в сверхпроводящее состояние ($T < T_c$), но до появления сверхпроводимости в межзеренных связях. Этот максимум связан с гистерезисными потерями в зернах и объемной сверхпроводимостью. По зависимости $\chi''(T)$ можно судить о фазовом составе керамического материала.

Система Bi-Sr-Ca-Cu-O дает начало нескольким различным фазам, имеющим тетрагональную или

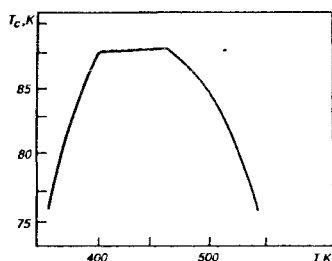


Рис. 16.5. Зависимость T_c от температуры отжига иттриевого сверхпроводника

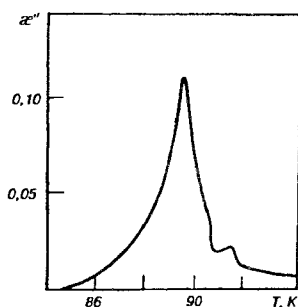


Рис. 16.6. Температурная зависимость магнитной восприимчивости χ'' для керамического материала Y-Ba-Cu

Т а б л и ц а 16.18
Параметры решетки ВТСП
на основе Bi-Sr-Ca-Cu

Содержание компонентов в формуле	Состав фазы пленок	Параметры решетки, Å	T_c , K
2-2-0-1	Bi-Sr-Ca-Cu	24,2	7
2-2-2-1	Bi-Sr-Ca-Cu	24,5	—
2-2-3-4	Bi-Sr-Ca-Cu	30	80
1-1-1-2	Bi-Sr-Ca-Cu	30	80
2-2-1-2	Bi-Sr-Ca-Cu	30,7	80
2-3-3-2	Bi-Sr-Ca-Cu	30,8	80
4-3-3-4	Bi-Sr-Ca-Cu	37	80, 110
2-2-2-3	Bi-Sr-Ca-Cu	37	110
2-4-4-3	Bi-Sr-Ca-Cu	37	110
5-4-4-6	Bi-Sr-Ca-Cu	37	110

псевдотетрагональную слоистую структуру. В табл. 16.18 приведены известные висмутсодержащие кристаллические фазы пленочных структур.

Методом ВЧ магнетронного распыления были получены пленки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_8$ на подложках MgO , Al_2O_3 , SrTiO_3 . Распыление велось с мишени аналогичного состава в атмосфере аргона. Отжиг проводился при температуре 870 — 890 °С в течение 1 ч на воздухе. Лучшие результаты были достигнуты для пленок на подложках MgO , отожженных при 880 °С, $T_c = 80$ К. Пленки на подложках SrTiO_3 были более низкого качества, а пленки на подложках сапфира становились серыми и не сверхпроводящими. Вероятно, это связано с большим различием значений температурных коэффициентов расширения материала подложки и ВТСП материала тонкого слоя. Из материала подложки происходит диффузия алюминия в пленку, тем самым ухудшая ее сверхпроводящие свойства. Исследования различных составов висмутовой системы показали, что у большинства из них сверхпроводимость проявляется в области температур 80—90 К. Причем, по данным рентгеноструктурного анализа во всех этих случаях сверхпроводимость обеспечивает одна и та же легко образующаяся фаза состава $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$.

Для получения тонких пленок часто используется материал состава $\text{Bi}_{2,0}\text{Ca}_{1,0}\text{Sr}_{2,0}\text{Cu}_{2,0}\text{O}_8$. Так, методом осаждения из раствора были получены пленки состава $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1,8}\text{Ca}_{1,6}\text{Cu}_{2,1}\text{O}_8$ на подложках MgO . После отжига при $T = 890$ °С в течение 5 ч на пленке были обнаружены две области: светло-серая и темно-серая. Данные электронно-зондового микроанализа таковы: этим областям соответствуют химические составы: $\text{Bi}_{2,1}\text{Sr}_{1,2}\text{Ca}_{1,2}\text{Cu}_{1,6}\text{O}_8$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1,8}\text{Ca}_{1,6}\text{Cu}_{2,1}\text{O}_8$. Первая область близка по составу к стехиометрическому $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$, что свидетельствует о низкотемпературной фазе ($T_c = 80$ К). Второй области соответствует идеальный стехиометрический состав $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$,

что соответствует высокотемпературной фазе ($T_c = -120$ К). Образцы, состоящие из низкотемпературной фазы, имели $T_c = 91$ К и нулевое сопротивление при 83 К. Образцы, содержащие высокотемпературную фазу, являлись сверхпроводящими при $T_c = 103$ К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

16.1. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 3/ Под ред. Ю.В. Корицкого. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

16.2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

16.3. Достижения электронной теории металлов/ Пер. с нем.; Под ред. П. Циге, Т. Леманна. М.: Мир, 1984.

16.4. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические матери-

алы/ Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.

16.5. Шриффер Дж. Теория сверхпроводимости. М.: Наука, 1970.

16.6. Линтон Э. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975.

16.7. Буккель В. Сверхпроводимость. М.: Мир, 1975.

16.8. Де Жен П. Сверхпроводимость металлов и сплавов. М.: Мир, 1968.

16.9. Роуз-Икс, Родерик Е. Введение в физику сверхпроводимости. М.: Мир, 1972.

16.10. Пашицкий Э.А. Основы теории сверхпроводимости. Киев: Вища школа, 1985.

16.11. Гинзбург В.А., Кирхсниц Д.А. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. М.: Наука, 1977.

16.12. Номерованная Д.В. Влияние закалки на свойства СП керамики Bi-Sr-Ca-Cu-O различного состава// Сверхпроводимость: физика, химия, техника, 1987. Т.2. №10.

Раздел 17

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СОДЕРЖАНИЕ

17.1. Назначение магнитных материалов. Общие сведения о параметрах и характеристиках	365	17.5. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса	377
17.2. Классификация магнитных материалов	367	17.6. Магнитомягкие материалы специального назначения	380
17.3. Магнитные материалы для работы в широком диапазоне изменения магнитной индукции на низких и повышенных частотах	370	17.7. Магнитные материалы для постоянных магнитов	383
17.4. Магнитные материалы для работы в слабых магнитных полях	374	17.8. Аморфные магнитомягкие сплавы	386
		17.9. Классификация, области применения, параметры и характеристики аморфных магнитомягких материалов	386
		Список литературы	392

17.1. НАЗНАЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАРАМЕТРАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Магнитные материалы имеют в технике широкое применение. В основном они играют роль концентраторов, проводников и источников магнитного потока. Магнитные материалы являются основой для производства современных генераторов и двигателей, трансформаторов, различных типов аппаратов и приборов автоматики, вычислительной и измерительной техники, электромагнитов и дросселей, постоянных магнитов и т.д.

В общем случае все магнитные материалы принято делить на две большие группы: магнитомягкие, используемые в основном как проводники

магнитного потока; магнитотвердые, используемые как источники магнитного поля.

Необходимые характеристики магнитных материалов определяются в процессе перемагничивания, описываемого при циклическом изменении магнитного поля в координатах магнитной индукции (намагниченности M) и напряженности поля H петель гистерезиса (рис. 17.1). При этом связь магнитной индукции, намагниченности и напряженности поля выражается соотношением

$$B = \mu_0 (H + M),$$

где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

По петле магнитного гистерезиса определяются основные параметры магнитных материалов: индукция насыщения B_s , максимальная напряженность поля H_{max} , остаточная индукция B_r ,

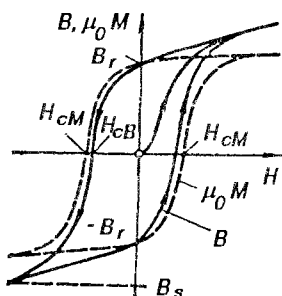


Рис. 17.1. Зависимость магнитной индукции и намагниченности ферромагнитного материала от напряженности поля

коэрцитивная сила H_c . Площадь, заключенная внутри петли магнитного гистерезиса, является мерой энергии, преобразованной в теплоту при перемагничивании. Энергия, затраченная на перемагничивание 1 м^3 объема магнитного материала, определяется по формуле

$$w_r = \mu_0 \int H dM \int H dB.$$

Кривая $B(H)$ может быть преобразована в кривую $M(H)$. Поэтому, как видно из рис. 17.1, следует различать понятия коэрцитивной силы по индукции H_{cB} и коэрцитивной силы по намагниченности H_{cM} . Зависимость $B(H)$ при монотонном изменении напряженности поля от нуля до максимального значения называется первоначальной кривой намагничивания. Для расчетов пользуются основной кривой намагничивания, получаемой соединением вершин симметричных петель гистерезиса, получаемых при различных максимальных значениях напряженности поля (рис. 17.2).

Связь напряженности магнитного поля H и намагниченности магнитного материала M выражается через коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью χ :

$$\chi = M / H.$$

Отношение магнитной индукции B к напряженности поля H в материале определяется абсолютной магнитной проницаемостью:

$$\mu_a = B / H.$$

В общем случае, если магнитная индукция и напряженность поля являются векторами, то проницаемость — тензор. Численно проницаемость характеризуется относительной проницаемостью

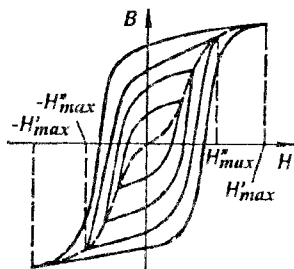


Рис. 17.2. Симметричные петли гистерезиса магнитного материала

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0.$$

Отношение изменения ΔB к соответствующему изменению ΔH на кривой намагничивания дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость

$$\mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0 dH}.$$

Полученная таким образом величина в полях с напряженностью, близкой к нулю, носит название относительной начальной проницаемости μ_n , а максимальное ее значение на всей кривой намагничивания — относительной максимальной проницаемости $\mu_{r \max}$.

Для характеристики магнитотвердых материалов пользуются понятием размагничивающей части петли гистерезиса, находящейся во втором квадранте координатной плоскости $B(H)$. При наличии у постоянного магнита воздушного зазора остаточная индукция его B_d меньше остаточной индукции материала B_r , измеренной в замкнутой магнитной цепи. Поэтому качество постоянных магнитов характеризуется, как правило, максимальным значением произведения $(BH)_{\max}$ (рис. 17.3), которое определяет максимальную магнитную энергию $W_{\max}$. Наибольшая энергия, отдаваемая магнитом, получается тогда, когда для данной формы магнита подобран материал, имеющий максимальное значение произведения BH . В этом случае остаточная индукция магнита B_d в сильной степени зависит от формы размагничивающей части кривой $B(H)$ и размагничивающего фактора N , определяемого геометрическими соотношениями магнита и воздушного зазора. Истинное значение напряженности поля определяется соотношением

$$H_i = H_e - NM,$$

где H_e — внешнее поле; H_i — поле внутри материала, а магнитной индукции — соответственно

$$B = \mu_0(H_e + M - NM).$$

Для оценки стабильности постоянных магнитов пользуются понятием относительной проницаемости возврата $\mu_{r \text{возв}}$, которая является мерой чувствительности магнитотвердого материала к воздействию внешних магнитных полей (рис. 17.3) и определяется как

$$\mu_{r \text{возв}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}.$$

Все перечисленные параметры могут быть определены из статической петли гистерезиса, получен-

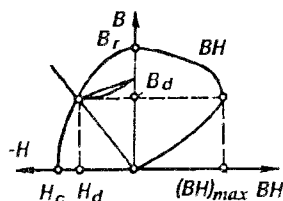


Рис. 17.3. Кривая размагничивания и зависимость энергии магнитного материала от напряженности поля

ной при относительно медленном изменении внешнего магнитного поля. Если же время установления напряженности поля соизмеримо со временем перемагничивания материала, то магнитные параметры определяются динамическими характеристиками (петлями гистерезиса), на характер которых влияют такие факторы, как вихревые токи, магнитная вязкость. Основными характеристиками являются: динамическая кривая намагничивания — зависимость максимального значения индукции от максимального значения напряженности поля для семейства симметричных динамических петель гистерезиса; динамическая магнитная проницаемость μ_{ra} (часто называемая амплитудной) — отношение индукции к напряженности поля на динамической кривой намагничивания. Чаще всего амплитудная проницаемость определяется соотношением

$$\mu_{ra} = B_{max} / \mu_0 H_{max},$$

где B_{max} , H_{max} — соответственно максимальные значения магнитной индукции и напряженности поля.

Для многих материалов в качестве справочных характеристик приводят удельные потери мощности на частотах 50, 400 Гц при различных значениях индукции (например, $P_{1.0/50}$ — потери на частоте 50 Гц при индукции, равной 1 Тл); значение тангенса угла потерь. При этом обязательным является указание толщины ленты или пластины из данного магнитного материала.

Особого внимания заслуживает чувствительность магнитных материалов к изменению температуры. Здесь следует различать обратимые изменения свойств материалов в диапазоне незначительных изменений температуры и необратимые изменения в широком диапазоне температуры, называемые старением. Для учета стабильности в первом случае используются значениями температурных коэффициентов α_B , приводимых в справочных данных на материал и определяемых из выражения

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \Delta T},$$

где ΔB — изменение индукции, вызванное изменением температуры на ΔT ; B — магнитная индукция при начальной температуре.

Температурную стабильность магнитных свойств магнитных материалов часто характеризуют температурными коэффициентами проницаемости, определяемыми как

$$\alpha_\mu = \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r1} (T_2 - T_1)},$$

где T_2 и T_1 — значения температуры, при которой измерены μ_{r2} и μ_{r1} .

Необратимые процессы характеризуются температурой Кюри и заключаются в исчезновении самопроизвольной намагниченности, уменьшении магнитной проницаемости.

17.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Деление магнитных материалов на магнитомягкие и магнитотвердые не дает полного представления о их магнитных свойствах, чувствительности к различным воздействиям, возможности использования для конкретных целей. Обычно с понятием чувствительности свойств магнитных материалов к различного рода воздействиям связывают представления о факторах, которые оказывают на них отрицательное влияние. Наиболее существенным в этом плане является химический состав материала (процентное содержание легирующих компонентов или наличие примесей). Так, например, в железо-никелевых сплавах различная доля присадки никеля ведет к изменению намагниченности насыщения, равному 75% насыщения чистого железа (рис. 17.4). Изменяются также температура Кюри Θ , константы магнитострикции и анизотропии, магнитная проницаемость, остаточная индукция, коэрцитивная сила, потери на гистерезис. Это открывает большие возможности для получения материалов с требуемыми свойствами.

Для получения магнитных материалов с большими удельными электрическим сопротивлением и магнитной проницаемостью используют добавку к железу кремния, обезуглероживающего примеси железа. Это приводит к снижению потерь на вихревые токи при работе материала в переменных полях (рис. 17.5). Эту группу материалов составляют в основном марки электротехнической стали, в том числе и нелегированной. Расшифровываются марки электротехнической стали следующим образом: первая цифра обозначает вид обработки,

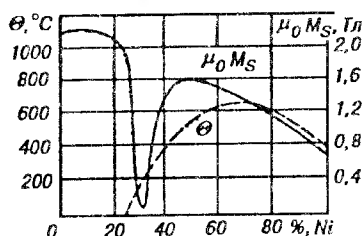


Рис. 17.4. Зависимость намагниченности насыщения и точки Кюри от содержания присадок никеля в железо-никелевых сплавах

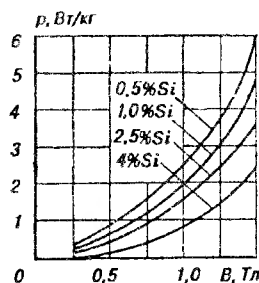


Рис. 17.5. Зависимость удельных потерь от индукции при различном содержании кремния

структурное состояние (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная); вторая цифра — содержание кремния (0 — до 0,4 %; 1 — от 0,4 до 0,8 %; 2 — от 0,8 до 1,8 %; 3 — от 1,8 до 2,8 %; 4 — от 2,8 до 3,8 %; 5 — от 3,8 до 4,8 %); третья цифра — основной нормируемый параметр (0 — удельные потери при $B = 1,7$ Тл на $f = 50$ Гц; 1 — удельные потери при $B = 1,5$ Тл на $f = 50$ Гц; 2 — удельные потери при $B = 1$ Тл на $f = 400$ Гц; 6 — магнитная индукция при $H = 0,4$ А/м; 7 — магнитная индукция при $H = 10$ А/м); четвертая цифра — порядковый номер типа стали.

Марки нелегированной электротехнической стали расшифровываются по следующему принципу: первая цифра обозначает вид обработки (1 — горячекатаная; 2 — холоднокатаная); вторая цифра — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения); третья цифра — нормируемый параметр (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая цифры — значение нормируемого параметра в целых единицах (H_c , А/м).

Наивыгоднейшим сплавом для обеспечения высокого значения магнитной проницаемости является сплав железа с никелем (пермаллой). Высокие магнитные свойства пермаллоя объясняются малыми значениями констант анизотропии и магнито-стрикции. При этом значение константы анизотропии может менять знак в зависимости от содержания никеля. Дальнейшее улучшение свойств этих сплавов достигается специальными видами термической обработки (рис. 17.6). Большая начальная и максимальная проницаемость, высокая индукция насыщения и малая коэрцитивная сила обеспечиваются использованием сплавов с 45 и 50%-ным содержанием никеля (45Н и 50Н). Большая прямоугольность гистерезисного цикла достигается использованием сплавов с кристаллической и магнитной текстурами, а повышение чувствительности к слабым магнитным полям — легированием пермалловых сплавов молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью.

При расшифровке пермалловых сплавов первая цифра обозначения указывает на содержание никеля, %, буква П обозначает прямоугольность петли гистерезиса, средние буквы указывают на наличие

легирующих элементов (М — молибден, К — кобальт, Х — хром и т.д.).

Материалы, работающие в динамическом режиме, должны обладать большим электрическим сопротивлением для получения минимальных потерь на вихревые токи в широком частотном диапазоне. Большое распространение здесь получили неметаллические магнитные материалы — ферриты, электрические и магнитные свойства которых в сильной степени зависят от состава и структуры сплава. Наибольшее значение начальной магнитной проницаемости имеют никель-цинковые и марганцово-цинковые сплавы. При расшифровке марок ферритов никель-цинковым сплавам соответствуют буквы НН; марганцово-цинковым — НМ; число в начале обозначения определяет значение начальной магнитной проницаемости.

Намного раньше ферритов промышленное внедрение получили магнитодиэлектрики. Исходным материалом для них служило карбонильное железо-порошок. Большое распространение получили магнитодиэлектрики на основе порошка из сплава альсифер (85 % Fe; 9,5 % Si; 5,5 % Al).

Для получения постоянных магнитных полей большой напряженности используются постоянные магниты, выполненные из магнитотвердых материалов. Раньше для изготовления магнитотвердых материалов использовались углеродистые стали с содержанием углерода до 1 %. Улучшение свойств магнитотвердых материалов достигалось добавлением легирующих элементов (вольфрам, хром, молибден, кобальт). Стремление к удешевлению магнитотвердых материалов привело к созданию сплавов (ЮНД) на основе железа, никеля и алюминия (12 % Al; 25 % Ni). Добавление к этим сплавам кобальта (ЮНДК) увеличивает H_c , но одновременно уменьшает B_r . Охлаждение сплавов от точки Кюри в магнитном поле делает материал анизотропным (текстурованным). При этом увеличивается B_r , петля гистерезиса становится прямоугольной, увеличивается магнитная энергия. Дальнейшее улучшение магнитных свойств магнитотвердых материалов (увеличение H_c и w_{max}) достигается использованием компонент из драгоценных металлов (ПЛК) и редкоземельных материалов (КС). При расшифровке магнитотвердых материалов буквы указывают на наличие компонентов сплава (К — кобальт; Н — никель; Пл — платина; С — самарий; Ю — алюминий и т.д.). Рекордный уровень магнитной энергии и остаточной индукции имеют в настоящее время магнитотвердые материалы на основе сплава Nd — Fe — В, правда, уступающие самарий-кобальтовым магнитотвердым материалам по температурной стабильности.

Большие значения констант анизотропии и размеров однодоменных частиц привели к очень широкому использованию для изготовления постоянных магнитов бариевых ферритов. Улучшенные характеристики наблюдаются у магнитотекстурованных образцов (прессование в магнитном поле). Нетекстурованные магниты из бариевых ферритов обозначаются БИ, а текстурованные — БА.

Одним из классифицирующих критериев приме-

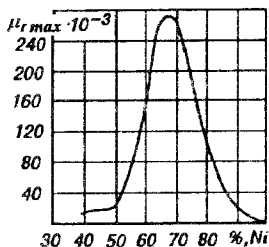


Рис. 17.6. Зависимость максимальной магнитной проницаемости пермаллоя от содержания никеля при термической обработке в магнитном поле

нимости материала для тех или иных целей является рабочий участок кривой перемагничивания на петле магнитного гистерезиса. На рис. 17.7 представлены области работы основных групп магнитных материалов в зависимости от их использования.

От материалов, область работы которых определяется всей петлей гистерезиса (рис. 17.7, а), требуются, как правило, высокое значение индукции насыщения, малые потери на перемагничивание. Используются такие материалы (в основном электротехническая сталь) во многих электротехнических устройствах, включая машины постоянного и переменного тока, силовые трансформаторы, силовую коммутационную аппаратуру, работающие на низких и повышенных частотах.

На рис. 17.7, б представлена область работы материалов, от которых требуются высокая проницаемость на начальном участке кривой $B(H)$, малые потери на гистерезис и вихревые токи. Применяются такие материалы (электротехническая сталь, пермаллой, ферриты и магнитодиэлектрики) в аппаратуре передачи и приема информации, малогабаритных трансформаторах питания, дросселях и т.п. в областях средних, высоких и сверхвысоких частот.

В измерительных и регулировочных трансформаторах при изменении индукции в пределах 0,1—0,3 Тл требуются материалы с большой и мало изменяющейся проницаемостью. Распространение здесь получила текстурованная кремнистая сталь с содержанием кремния по 6%, имеющая большое удельное электрическое сопротивление ρ . Возможно применение и железоникелевых сплавов (содержание никеля 50—75%) с малой толщиной листов материала.

Особые требования предъявляются к материалам магнитопроводов импульсных трансформаторов, работающих с унipoлярными импульсами. Важной здесь является большая относительная импульсная проницаемость

$$\mu_{ги} = \frac{B_{max} - B_r}{\mu_0 H_{max}}$$

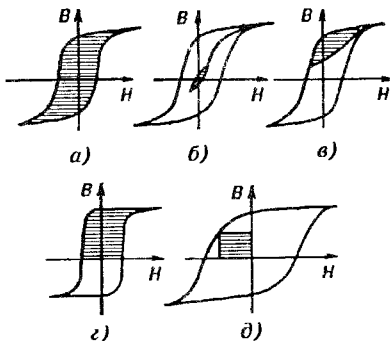


Рис. 17.7. Области работы основных групп магнитных материалов:

а — материалы для работы в широком диапазоне изменения индукции; б — материалы для работы в слабых полях; в — материалы для магнитопроводов релейных и импульсных устройств; г — материалы для запоминающих устройств и магнитных усилителей; д — материалы для постоянных магнитов

Обеспечивается это условие высокой индукцией насыщения и малым значением остаточной индукции используемого материала (рис. 17.7, в). Для выполнения указанных требований используют специальные железоникелевые сплавы с $B_r/B_{max} = 0,2$ и марганцово-цинковые ферриты, имеющие это отношение на уровне 0,2—0,3 и начальную относительную проницаемость не менее 5000. При использовании материалов с прямоугольной петлей гистерезиса большой эффект дает подмагничивание полем противоположной полярности (рис. 17.8). Так, подмагничивание отрицательным полем H_0 приводит к изменению индукции $\Delta B''$ при воздействии унipoлярного импульса, намного превосходящего изменение $\Delta B'$ в отсутствие подмагничивающего поля.

Требования к материалам магнитопроводов реле и различной коммутационной аппаратуры (см. рис. 17.7, в) определяются надежностью срабатывания, отпущения и быстродействием. В этой группе устройств используют обычно малоуглеродистую сталь. В чувствительных реле высокого быстродействия нашли применение пермаллой (шихтованный магнитопровод) и магнитомягкие ферриты. В нормальных коммутационных реле переменного тока применяется низколегированная электротехническая сталь.

В вычислительной технике большое распространение приобретает способ запоминания информации на магнитных элементах. Для обеспечения надежности записи и воспроизведения информации требуются материалы с высокой намагниченностью. Это позволяет получить большую разность индукций между B_r при одном направлении поля и B_{max} при противоположном. Кривая перехода от B_r к $-B_{max}$ должна быть крутой для обеспечения значительной скорости изменения индукции dB/dt . С этой же целью электропроводность материала по возможности должна быть низкой. Кроме коэффициента прямоугольности $\alpha_n = B_r/B_{max}$ качество магнитного материала (рис. 17.7, г) оценивается коэффициентом квадратичности R_s (рис. 17.9)

$$R_s = \frac{B(\text{при } -0,5H_{max})}{B(\text{при } +0,5H_{max})}$$

Высококачественный материал должен иметь большой коэффициент R_s , узкую петлю гистерезиса и минимальное время переключения, определяемое как

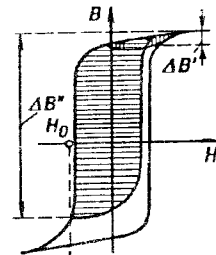


Рис. 17.8. Кривые импульсного намагничивания материалов без подмагничивания и с подмагничиванием постоянным магнитным полем

Т а б л и ц а 17.2

Сталь сортовая электротехническая нелегированная (ГОСТ 11036-75)

Марка	H_c , А/м	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
		500	1000	2500
10895, 20895, 11895, 21895	95	1,32	1,45	1,54
10880, 20880, 11880, 21880	80	1,36	1,47	1,57
10864, 20864, 11864, 21864	64	1,40	1,50	1,60

Т а б л и ц а 17.3

Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной анизотропной стали
(ГОСТ 21427.1-83)

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м	
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	1,75
3412	0,50	0,95	2,10	2,80	—	1,80
	0,35	0,70	1,50	2,20	—	1,80
3413	0,50	0,80	1,75	2,50	—	1,85
	0,30	—	1,19	1,75	—	1,85
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	—	1,88
	0,27	—	1,03	1,55	—	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	—	1,90
	0,27	—	0,95	1,38	—	1,90
3404	0,35	—	—	1,60	1,60	—
	0,30	—	—	1,50	1,60	—
3405	0,35	—	—	1,50	1,61	—
	0,27	—	—	1,38	1,61	—
3406	0,35	—	—	1,43	1,62	—
	0,27	—	—	1,27	1,62	—
3407	0,35	—	—	1,36	1,68	—
	0,27	—	—	1,20	1,68	—
3408	0,35	—	—	1,30	1,71	—
	0,27	—	—	1,14	1,71	—

Т а б л и ц а 17.4

Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали
(ГОСТ 31427.2-83)

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м	
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500
2011	0,65	3,8	9,0	1,48	1,60
	0,50	3,5	8,0	1,49	1,60
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65
2111	0,65	4,3	10,0	1,45	1,58
	0,50	3,5	8,0	1,46	1,58
2211	0,65	3,0	7,0	1,40	1,56
	0,50	2,6	5,8	1,40	1,56
2311	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54
2411	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50
2413	0,50	—	2,9	1,35	1,50
	0,35	—	2,0	1,35	1,50
2421	0,28	$P_{0,75/400}$	$P_{1,0/400}$	1,35	1,47
		10,7	19,5		

Т а б л и ц а 17.5

Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали (ГОСТ 21427.2-83)

Марка	Толщина, мм	Удельные потери Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м				
		$P_{0,1/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	30 000
1211	1,00	5,8	13,4	—	1,53	1,63	1,76	2,00
	0,50	3,3	7,7	—	1,53	1,64	1,76	2,00
1213	1,00	4,7	10,7	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,65	3,2	7,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1311	0,50	2,8	6,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1313	0,50	2,5	6,1	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1411	0,50	2,1	4,6	—	1,48	1,55	1,73	1,95
	0,35	2,0	4,4	—	1,46	1,57	1,72	1,94
1413	0,50	1,6	3,6	—	1,46	1,57	1,71	1,92
	0,35	1,55	3,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94
1511	0,50	1,35	3,0	—	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1513	0,50	1,35	3,0	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
	0,35	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	1,05	2,5	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89

Для изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов применяют горячекатаную электротехническую сталь марок 1511—1514 и холоднокатаную текстурованную сталь марок 3411—3415.

Для электрических машин, турбо- и гидрогенераторов большой мощности с массивными магнитопроводами основным магнитным материалом является горячекатаная сталь марок 1511—1514. Сравнительные характеристики описанных марок горячекатаной и холоднокатаной стали приведены на рис. 17.11 и 17.12. Применяют для этих целей также горячекатаную сталь марок 1311, 1411 и холоднокатаную сталь марок 2411, 2412.

При изготовлении магнитных систем электрических машин мощностью до 100 кВт применяют слаболегированную горячекатаную сталь марок 1211, 1212. Более высокой проницаемостью и более низкими потерями обладает холоднокатаная малотекстурованная сталь марок 2211, 2212 по сравнению с горячекатаной той же степени легирования кремнием.

В магнитопроводах силовых агрегатов, работающих на повышенных частотах (400 Гц и более), применяются тонколистовые материалы из горяче-

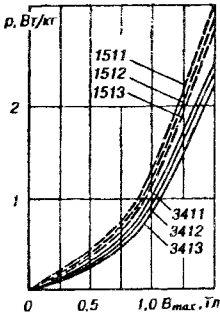


Рис. 17.12. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции холоднокатаной и горячекатаной стали

катаной стали марки 1521 и холоднокатаной текстурованной стали марок 3421—3425. Уменьшение толщины ленты обусловлено необходимостью уменьшения потерь и малого снижения проницаемости при повышенных частотах работы материала (табл. 17.6, 17.7).

В магнитных системах, работающих на переменном токе частотой от 50 до нескольких тысяч герц в широком диапазоне изменения индукции (0,01—1,5 Тл) используется, как правило, горячекатаная сталь марок 1571, 1572 (табл. 17.8).

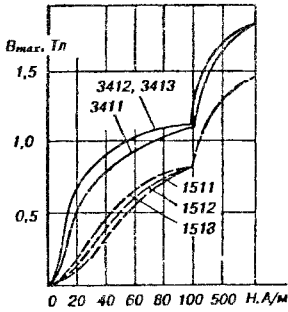


Рис. 17.11. Зависимость амплитуды индукции от действующего значения напряженности поля холоднокатаной и горячекатаной стали

Т а б л и ц а 17.6
Магнитные свойства стали 1521
(ГОСТ 21427.2-83)

Марка	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг	
		500	1000	2500	$P_{0,75/400}$	$P_{1,0/400}$
1521	0,35	1,21	1,30	1,44	10,7	19,0
	0,22	1,20	1,29	1,42	8,0	14,0
	0,2	1,20	1,29	1,42	7,2	12,5
	0,1	1,19	1,28	1,40	6,0	10,5

Т а б л и ц а 17.7
Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали (ГОСТ 21427.4-78)

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг		H_c , А/м, не более	Магнитная индукция, Тл, при напряженности поля, А/м					
		$P_{1,0/400}$	$P_{1,5/400}$		40	80	200	400	1000	2500
3421	0,20	—	—	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
	0,15	10,0	23	34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	10,0	22	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	10,0	21	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422	0,15	9,0	20	32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	8,5	19	32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19	36	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,15	8,0	19	26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3423	0,08	7,5	17	28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
	0,05	—	17	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
	0,15	—	18	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	—	16	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3424	0,05	7,5	16	32	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,15	—	17	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	—	15	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	15	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
3411	0,20	$P_{1,7/400}$ 2,2	1,5	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70

Таблица 17.8

Магнитные свойства стали марок 1571 и 1572 (ГОСТ 21427.2-83)

Марка	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м							
		10	20	50	70	100	200	500	1000
1571	0,35	0,035	0,14	0,48	0,61	0,77	0,92	1,21	1,30
	0,20	0,03	0,10	0,38	0,58	0,66	0,90	1,18	1,29
1572	0,35	0,045	0,17	0,57	0,71	0,87	1,02	1,25	1,30
	0,20	0,04	1,14	0,48	0,62	0,74	0,92	1,20	1,29

При работе магнитных материалов в диапазоне частот 50—5000 Гц могут быть использованы более дорогие железоникелевые сплавы марок 50Н, 45Н. Основное применение они нашли в аппаратуре связи в качестве магнитопроводов малогабаритных трансформаторов питания, деталей магнитных систем, работающих в повышенном диапазоне частот. Магнитные свойства сплавов марок 50Н и 45Н приведены в табл. 17.9.

На рис. 17.13, 17.14 показаны основные кривые намагничивания сплава 45Н и зависимость потерь

от максимальной магнитной индукции при различных частотах для сплава 50Н. Следует отметить, что, имея высокие значения B_s и μ_{rmax} , низкое значение H_c , указанные материалы обладают высокой чувствительностью магнитных свойств к механическим напряжениям.

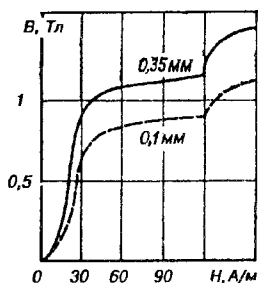


Рис. 17.13. Основные кривые намагничивания сплава марки 45Н

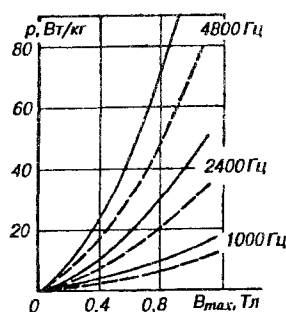
Рис. 17.14. Зависимость удельных потерь от амплитуды магнитной индукции сплава марки 50Н при различных частотах:
— толщина ленты 0,1 мм; ———— толщина ленты 0,05 мм

Таблица 17.9

Магнитные свойства сплавов с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения (ГОСТ 10160-75)

Марка сплава	Вид продукции	Толщина, диаметр, мм	Класс	$\mu_{сн} \cdot 10^{-3}$	$\mu_{rmax} \cdot 10^{-3}$	H_c , А/м	B_s , Тл
50 Н	Холоднокатаные ленты	0,05—0,08	I	2,0	20	20	1,50
		0,10—0,15		2,3	25	16	1,50
		0,20—0,25		2,6	30	12	1,50
		0,35—0,50		3,0	35	10	1,50
		0,80—1,00		3,0	30	12	1,50
		1,50—2,50		2,8	25	13	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2,5	20	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2,5	20	24	1,50
	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	II	3,0	30	14	1,50
		0,20—0,25		3,5	35	12	1,50
		0,35—0,50		4,0	45	10	1,50
		0,80—1,00		4,0	40	10	1,50
		1,50—2,00		3,0	35	12	1,50
		0,05—0,20	III	10	60	0,4	1,52
45Н	Холоднокатаные ленты	0,10—0,15	I	2,0	20	24	1,50
		0,20—0,25		2,5	23	20	1,50
		0,35—2,5		2,8	25	16	1,50
	Горячекатаные листы	3—22	—	2,0	18	24	1,50
	Прутки	8—100	—	2,0	18	24	1,50

17.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Магнитные материалы для элементов аппаратуры приема и передачи информации, магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, дросселей, дефектоскопов, магнитных экранов и многих других элементов высокочувствительной аппаратуры, работающей в переменных полях высокой частоты, должны удовлетворять требованиям узкого гистерезисного цикла и большой крутизны $B(H)$ в слабых магнитных полях.

Для этих целей получила распространение горячекатаная сталь марок 1561, 1562, работающая в звуковом диапазоне частот с амплитудой индукции $10^{-4} - 10^{-3}$ Тл (табл. 17.10).

На рис. 17.15 приведены зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности магнитного поля электротехнической стали марок 1561, 1562 (толщина ленты 0,2 мм), работающей на частотах 400 и 1000 Гц.

Ассортимент магнитных материалов, работающих на начальном участке технической кривой намагничивания, не ограничивается листовой электротехнической сталью. Широкое распространение получил здесь высоконикелевый пермаллой марок 79НМ, 80НХС, 76НХД, 77НДМ, содержащий соответственно 79, 80, 76 и 77% никеля, легированный молибденом, ванадием, вольфрамом, хромом и медью (табл. 17.11). На рис. 17.16 и 17.17 приведены кривые намагничивания и зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля материалов, рекомендуемых для работы в слабых полях (79НМ, 50НХС, 80НХС). С ростом частоты проницаемость у этих материалов снижается и тем сильнее, чем выше было ее значение в постоянном поле (рис. 17.18). Наряду с выпускаемыми согласно ГОСТ 10160-75 материалами для работы в слабых магнитных полях используются сплавы 76НХД, 80НХ, 80НМ, 77НМД, 77НВ, 83НФ, 81НМА, 72НМДХ. Сплавы 76НХД, 80НХ обладают повышенной температурной стабильностью максимальной проницаемости в интервале $-60 \div +60^\circ\text{C}$. В аппаратуре особо высокой точности используются сплавы 80НМ, 77НМД, имеющие значения магнитной проницаемости в слабых полях 60—40 мГн/м, низкое отношение $\mu_{r\max} / \mu_{rH}$. Малым коэффициентом нестабильности μ_r , повышенным удельным сопротивлением обладают сплавы 83НФ и 77НВ.

Т а б л и ц а 17.10

Сталь электротехническая тонколистовая
(ГОСТ 21427.2-83)

Марка	Толщина, мм	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м		
		20	40	80
1561	0,35—0,2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
1562	0,35—0,2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$

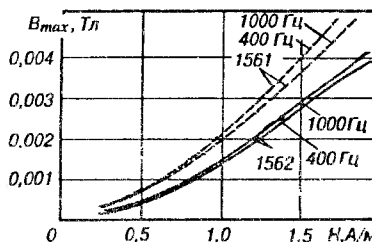


Рис. 17.15. Зависимость максимальной индукции от действующего значения напряженности поля стали марок 1561, 1562 при частотах 400 и 1000 Гц

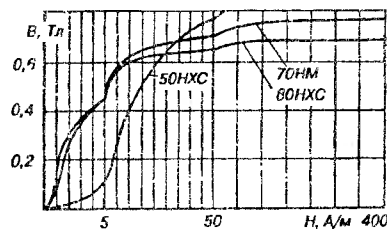


Рис. 17.16. Кривые намагничивания сплавов марок 79НМ, 80НХС, 50НХС

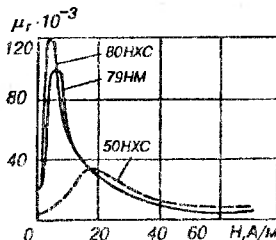


Рис. 17.17. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля сплавов марок 80НХС, 79НМ, 50НХС

Эти показатели очень важны при изготовлении магнитопроводов высокочувствительной аппаратуры. Сплав 81НМА основное применение нашел в магнитопроводах аппаратуры, подвергающейся механическим воздействиям. Сплав 72НМДХ нашел применение в магнитостатических экранах с высокой степенью экранирования.

Материалы, работающие при очень высоких частотах, должны иметь малые потери на вихревые токи и большую скорость установления намагниченности. Такими свойствами обладают ферриты. Удельное сопротивление их находится в пределах $5 \cdot 10^5 - 10^8$ Ом·м (у металлов 10^{-7} Ом·м). Магнитные свойства зависят от состава и структуры сплава. Так, у никель-цинковых ферритов можно получить $\mu_{rH} = 1000$ (табл. 17.12). На рис. 17.19 показаны кривые намагничивания никель-цинковых ферритов марок 200НН, 600НН, 2000НН. У

Таблица 17.11

Магнитные свойства сплавов с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях
(ГОСТ 10160-75)

Марка	Вид продукции	Толщина, диаметр, мм	$\mu_{гн} \cdot 10^{-3}$			$\mu_{г\max} \cdot 10^{-3}$			$H_c, \text{А/м}$			$B_s, \text{Тл}$		
			Класс											
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
79НМ	Холодноката- ные ленты	0,005	7	10	—	30	35	—	8,0	6,4	—	0,75	0,73	—
		0,01	14	16	20	60	90	120	5,6	3,2	2,4	0,75	0,73	0,73
		0,02	16	20	25	70	100	150	4,0	2,4	1,6	0,75	0,73	0,73
		0,05	16	20	30	90	120	200	3,2	1,6	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,08	16	20	—	90	120	—	3,2	1,6	—	0,75	0,73	—
		0,1	20	22	30	120	150	200	2,4	1,2	1,2	0,75	0,73	0,73
		0,15	20	22	—	120	150	—	2,4	1,2	—	0,75	0,73	—
	Холодноката- ные листы и ленты	0,20—0,25	22	25	30	130	180	220	1,6	1,2	1,0	0,75	0,73	0,73
		0,35—1,0	25	30	—	150	220	250	1,6	1,0	1,0	0,75	0,73	0,73
		1,5—2,0	22	25	—	130	180	—	1,6	1,6	—	0,75	0,73	—
		2,5	22	—	—	130	—	—	1,6	—	—	0,75	—	—
	Холоднотяну- тая проволока	0,05—0,1	5	—	—	40	—	—	6,4	—	—	0,75	—	—
	Горячеката- ные листы	3—22	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	80	—	—	3,2	—	—	0,75	—	—
80НХС	Горячекатаные листы	1,5—2,5	25	—	—	150	—	—	1,2	—	—	0,63	—	—
		3—22	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—
	Прутки	8—100	20	—	—	70	—	—	3,2	—	—	0,63	—	—

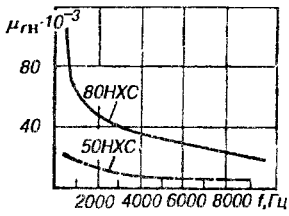


Рис. 17.18. Зависимость относительной магнитной проницаемости сплавов марок 50НХС и 80НХС от частоты

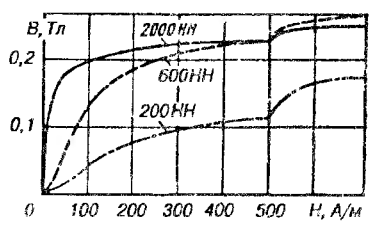


Рис. 17.19. Кривые намагничивания никель-цинковых ферритов марок 200НН, 600НН, 2000НН

марганцово-цинковых ферритов (табл. 17.13) значение $\mu_{гн}$ достигает 3000. Общим недостатком ферритов является сильная зависимость проницаемости от температуры. После открытия новых редкоземельных соединений типа граната к ферромагнетикам стали относить такие материалы, как феррогранаты и гексаферриты, широко применяемые в СВЧ-приборах [17.8].

Задолго до промышленного внедрения ферритов были разработаны магнитоэлектрики — материалы, состоящие из ферромагнитных частиц разме-

рами от 1 до 100 мкм, разделенных изолирующим веществом, и рассчитанные на работу при частоте выше 10 кГц.

Для этих материалов, работающих в области слабых полей, различают потери на гистерезис, вихревые токи и последствие (магнитную вязкость), характеризующихся соответственно коэффициентами δ_H (м/А), δ_v (1/Гц) и δ_n [17.2, 17.10]. Параметры магнитоэлектриков на основе карбонильного железа и альсифера, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 17.14, 17.15.

Т а б л и ц а 17.12

Основные параметры никель-цинковых ферритов

Марка	$\mu_{гн}$	$\mu_{г max} \cdot 10^{-3}$	H , А/м, при $\mu_{г max}$	Температурный коэффициент магнитной проницаемости, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при 20—70 $^\circ\text{C}$	H_c , А/м, при $H_{max} = 800$ А/м	B_r , Тл	ρ , 10^4 Ом·м
2000НН	1800—2400	7,0	12	3—9	9	0,06	10
1000НН	800—1200	3,0	32	5—15	30	0,083	20
600НН	500—800	1,6	56	6—15	40	0,17	10^2
400НН	350—500	0,8	80	5—15	68	0,087	10^3
200НН	130—250	0,3	160	4—10	96	0,096	10^3
100НН	80—120	1,7	120	5—45	67	0,20	10^7
150ВЧ	130—170	0,35	640	± 4	$24(H_{max} = 4000$ А/м)	0,17	10^4
100ВЧ	80—120	0,28	720	9	300	0,165	10^4
50ВЧ2	45—65	0,17	800	$-1,0 \div +9,0$	450	0,20	10^4
30ВЧ2	25—35	0,12	1200	± 35	720	0,16	10^5
20ВЧ	18—28	10,0	1600	± 10	650	0,046	10^4
300НН	280—350	0,6	240	35	96	0,13	10^6
200НН2	190—230	0,85	80	25	90	0,25	10^6
150НН	135—160	—	—	—	80	0,29	10^5
90НН	80—95	—	—	—	220	0,29	10^6
60НН	50—65	0,54	560	50	320	0,30	10^8
55НН	50—70	—	—	—	540	0,24	10^6
35НН	27—35	—	—	—	720	0,28	10^6
10ВЧ	9—14	0,04	3600	120	1700	0,78	10^8

Т а б л и ц а 17.13

Основные параметры марганцово-цинковых ферритов

Марка феррита	$\mu_{гн}$	$\mu_{г max} \cdot 10^{-3}$	H , А/м, при $\mu_{г max}$	Температурный коэффициент магнитной проницаемости, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при 20—70 $^\circ\text{C}$	H_c , А/м, при $H = 800$ А/м	B_r , Тл	ρ , 10^4 Ом·м
6000НМ	4800—8000	10	0,12	0,2—1,5	0,064	0,135	0,1
4000НМ	3500—4800	7,0	0,16	0,5—1,5	0,11	0,14	0,5
3000НМ	2700—3500	5,2	0,24	1—2	0,096	0,10	0,5
2000НМ	1700—2500	3,5	0,20	$-2 \div +4,5$	0,17	0,10	0,5
1500НМ	1200—1700	3,0	0,32	$-1,1 \div +7,0$	0,21	0,15	0,5
1000НМ	800—1200	2,0	0,8	$-0,5 \div +8,5$	0,22	0,086	0,5
2000НМ1	1700—2500	3,5	0,32	$-0,1 \div +1,0$	0,21	0,10	5
1500НМ1	1200—1700	3,0	0,32	$-0,1 \div +0,8$	0,20	0,080	5
1500НМ2	1200—1700	3,0	0,32	$-0,5 \div +0,8$	0,26	0,030	5
1500НМ3	1200—1800	3,0	0,48	0—0,7	0,088	0,060	20
1000НМ3	800—1200	2,0	0,8	0—1,0	0,30	0,083	10
700НМ	550—850	2,0	0,2	$-0,2 \div +1,2$	0,40	0,17	20
4000НМС	3300	5,3	0,24	—	0,68	0,087	0,5
3000НМС	2500	4,0	0,32	—	0,96	0,096	0,5
1100НМИ	1200	1,6	0,64	—	0,67	0,20	0,1

Т а б л и ц а 17.14

Параметры магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа

Марка порошка	$\mu_{rн}$	$\delta_r, 10^{-5} \text{ м/А}$	$\delta_b, 10^{-9} \text{ Гц}^{-1}$	$\delta_n \cdot 10^3$	Температурный коэффициент магнитной проницаемости, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при $-60 \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$
P-10	10—11	0,25—0,375	2—4	0,15—0,25	150—200
P-20	10—11	0,20—0,30	0,5—3,5	0,05—0,1	100—150
P-100	9—10	0,125—0,20	0,5—1,2	0,05—0,1	50—100
Пс	9,5	0,140	2	0,2	+50 ÷ - 50

Параметры магнитодиэлектриков на основе альсифера

Т а б л и ц а 17.15

Марка	$\mu_{rн}$	$\delta_r, 10^{-5} \text{ м/А}$	$\delta_b, 10^{-9} \text{ Гц}^{-1}$	$\delta_n \cdot 10^3$	Температурный коэффициент магнитной проницаемости, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	
					20—70 $^\circ\text{C}$	-60 ÷ +120 $^\circ\text{C}$
ТЧ-90	82—96	8,5	1000	3	-600	300—800
ТЧ-60	55—65	6,2	250	2	-500	100—500
ТЧК-55	50—55	6,2	250	2	-150 — + 50	100—400
ВЧ-32	30—34	2,5	85	1,2	-250	200—350
ВЧК-22	20—24	1,5	12	1,2	-50 — + 50	150
ВЧ-22	20—24	1,5	12	1,2	-200	—

При расшифровке марок магнитодиэлектриков число в конце обозначения соответствует значению начальной магнитной проницаемости.

17.5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

В ряде устройств, например в магнитных усилителях, бесконтактных реле, коммутационных дроселях, элементах вычислительной техники, требуются материалы с очень узким гистерезисным циклом, большим коэффициентом прямоугольности α_n высокой проницаемостью, низкой электрической проводимостью, минимальным временем переключения t_s .

Указанным требованиям удовлетворяют сплавы типа пермаллой с кристаллической (50НП, 47НМП), магнитной (65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП) текстурой и прямоугольным циклом гистерезиса ($\alpha_n = 0,85 \div 0,98$). Индукция насыщения у них 1,2—1,5 Тл (табл. 17.16). На рис. 17.20 для сравнения приведены петли магнитного гистерезиса сплавов, обладающих достаточно широким диапазоном значений B_r и H_c . Наиболее освоенными промышленностью являются сплавы 50НП и 50НПУ, имеющие $\mu_{r \max} = (3 \div 4) 10^4$, $\alpha_n = 0,85 \div 0,98$, $B_s = 1,5 \div 1,6$ Тл. Следует иметь в виду, что эти сплавы являются чувствительными к механическим напряжениям, приводящим к ухудшению магнитных свойств. Преимущественное применение сплавы типа 50 НП нашли в магнитопроводах магнитных усилителей, реакторов мощных механических выпрямителей, трансфор-

маторов аппаратуры связи. Сплав с повышенной $\mu_{rн}$ применяется для изготовления сердечников аппаратуры магнитной записи и особо точной аппаратуры связи.

Характерными особенностями сплавов 65НП, 68НМП являются высокая $\mu_{r \max} = (1 \div 5) 10^5$, прямоугольная петля гистерезиса ($\alpha_n = 0,9 \div 0,98$). Применяются сплавы этой подгруппы в основном для магнитопроводов бесконтактных магнитных элементов высокой чувствительности и точности.

Более высоким удельным сопротивлением при прочих равных условиях обладают сплавы 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМПЛ. Этим материалам свойственна одноосная анизотропия, обеспечивающая наивысший уровень магнитных свойств вдоль указанной оси. Широкое применение сплавы этой подгруппы нашли в магнитопроводах бескон-

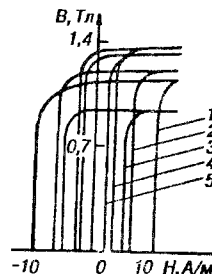


Рис. 17.20. Петли гистерезиса сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса:
1 — 50НП; 2 — 65НП; 3 — 34НКМП; 4 — 40НКМПЛ; 5 — 35НКХСП

Т а б л и ц а 17.16

Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса
(ГОСТ 10160-75)

Марка	Толщина, мм	Класс	$\mu_r \max \cdot 10^{-3}$	$H_c, \text{А/м}$	$B_r, \text{Тл}$	α_n при $H = 800 \text{ А/м}$
50НП	0,005	I	15	40	1,50	0,80
	0,01		20	32	1,50	0,83
	0,02		40	20	1,50	0,85
	0,05—0,1	II	40	18	1,50	0,85
	0,01		35	20	1,50	0,87
	0,02		60	15	1,50	0,92
	0,05—0,1	III	60	15	1,50	0,90
	0,01		60	15	1,52	0,91
	0,02		75	13	1,52	0,94
	0,05		80	11	1,52	0,94
34ННМП	0,005	I	15	80	1,50	0,90
	0,01		35	24	1,50	0,92
	0,02		40	16	1,50	0,90
	0,05	II	60	12	1,50	0,87
	0,1		100	8	1,50	0,85
	0,2—0,5		120	6,4	1,50	0,85
	0,01	II	40	16	1,50	0,92
	0,02		65	11	1,50	0,94
	0,05		75	10	1,50	0,92
	0,1	II	125	6,4	1,50	0,90
	0,2—0,5		180	6,4	1,50	0,90
35ННХСП	0,005	I	15	80	1,30	0,90
	0,01		30	24	1,30	0,85
	0,02		40	16	1,30	0,85
	0,05	II	60	12	1,30	0,85
	0,10		100	8	1,30	0,80
	0,2—0,5		120	6,4	1,30	0,80
	0,01	II	50	16	1,30	0,92
	0,02		80	8	1,30	0,92
	0,05		20	4,8	1,30	0,92
	0,1—0,5	II	30	4,0	1,30	0,92
40ННМП	0,01	I	100	6,4	1,35	0,93
	0,02		200	4,0	1,35	0,93
	0,05		300	3,2	1,35	0,92
	1,10	II	400	2,4	1,35	0,93
	0,01		200	4,8	1,35	0,94
	0,02		400	2,4	1,35	0,94
	0,05	II	500	1,6	1,35	0,94
	0,10		600	1,6	1,35	0,94
68ННМП	0,02	I	100	8,0	1,15	0,90
	0,05		200	5,6	1,15	0,90
	0,1—0,2		220	4,0	1,15	0,90
	0,02	II	200	4,0	1,15	0,90
	0,05		400	3,2	1,15	0,92
	0,1—0,2		600	2,4	1,15	0,93
	0,02	III	300	3,2	1,15	0,92
	0,05		600	2,4	1,15	0,93
	0,1—0,2		800	1,6	1,15	0,93
65НП	0,02	I	70	6,4	1,30	0,90
	0,05		100	3,2	1,30	0,90
	0,10		200	2,8	1,30	0,90
	0,20		250	2,4	1,30	0,90
	0,35—0,5		300	2,4	1,30	0,90

тактных магнитных элементов высокой чувствительности, работающих при повышенных частотах.

Для изготовления магнитопроводов магнитных усилителей используются сплавы 77НМДП, 79НМДП (толщина ленты 0,003 мм), обладающие относительно высокими значениями $\mu_{r \max} = (5 \div 10) 10^4$, коэффициентом прямоугольности $\alpha_n = 0,7 \div 0,85$; малым коэффициентом переключения (см. ниже) в импульсных полях $S_w = 30 \div 140 \text{ А} \cdot \text{мкс/м}$ (табл. 17.17).

Т а б л и ц а 17.17

Магнитные свойства сплавов толщиной 0,003 мм с
прямоугольной петлей гистерезиса
(ГОСТ 10160-75)

Марка	Вид продукции	$H_c, \text{А/м}$	$B_r, \text{Тл}$	α_n при $H_{\max} = 5 H_c$
79НМДП	Холоднокатаные ленты	9,6	0,6	0,90
77НМДП	То же	7,2	0,5	0,90

Для изготовления малогабаритных ленточных магнитопроводов переключающих устройств (логические элементы, регистры сдвига, триггерные схемы) применяются ленты микронной толщины (0,5—1 мкм). Высокой прямоугольностью петли гистерезиса и малым временем перемагничивания в импульсных полях обладают сплавы 79НМ и 77НМД и специально разработанные сплавы для тончайших лент 80Н2М и 80НЮ.

Контролируемыми параметрами в постоянных полях у них являются: максимальная индукция B_{max} , соответствующая H_{max} , остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c , коэффициент прямоугольности α_n , коэффициент «старта» $H_{ст}/H_c$, коэффициент «финиша» $H_{ф}/H_c$. Напряженность поля старта $H_{ст}$ и финиша $H_{ф}$ определяется, как показано на рис. 17.21. Свойства сплавов в импульсных полях характеризуются временем перемагничивания (коэффициентом переключения S_w) и пороговым полем H_0 , определяемыми по характеристике $1/t_s = f(H_n)$, где t_s — время перемагничивания; H_n — напряженность импульсного поля (рис. 17.22). Связь указанных величин определяется выражением

$$S_w = t_s(H_n - H_0) = \text{ctg } \varphi.$$

Основные свойства указанных сплавов приведены в табл. 17.18. По мере уменьшения толщины

ленты наблюдается увеличение H_c , α_n , а также уменьшение μ_n , μ_{max} и S_w (рис. 17.23).

Значительно позже металлических материалов появились ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Однако объем их внедрения из экономических соображений в настоящее время превзошел производство металлических сплавов. Высокое удельное сопротивление дает возможность изготовления ферритовых деталей в виде монолита. Низкая индукция насыщения ферритов не играет существенной роли при использовании их в запоминающих устройствах с ферромагнетиками. Ограничением являются низкие токи Кюри и как следствие большая температурная нестабильность магнитных свойств.

В табл. 17.19 приведены основные статические параметры нормализованных марок ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Основным видом изделий из ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, выпускаемых промышленностью, являются тороидальные магнитопроводы. Рекомендации по выбору материала магнитопровода весьма условны из-за большого разнообразия устройств и требований к ним. Как правило, для магнитопроводов запоминающих устройств рекомендуется использовать высококоэрцитивные ферриты марок 0,9ВТ; 1,3ВТ; 1,5ВТ; 1,7ВТ; 2ВТ (число в начале обозначения соответствует коэрцитивной силе в эрстедах). Объясняется

Таблица 17.18

Нормируемые магнитные свойства сплавов 79НМ, 77НМД, 80Н2М

Марка	Толщина, мкм	H_c , А/м	H_{Φ}/H_c	B_r , Тл	α_n , %	H_{CT}/H_c	S_w , А·мкс/м
		не более		не менее			
79НМ	3	9,6	—	0,6	90	—	—
77НМД	30	7,2	—	0,5	90	—	—
80Н2М	20	24	2,0	—	93	0,8	32

Таблица 17.19

Основные параметры ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса

Марка	Коэрцитивная сила H_c , А/м	B_r , Тл	$H_{ст}/H_c$	Температурный коэффициент коэрцитивной силы H_c , °С ⁻¹ при 20—70 °С
0,12ВТ	9,6±15%	0,2±15%	0,7	0,013
0,16ВТ	12,8±15%	0,2±15%	0,72	0,012
0,27ВТ	21,6±15%	0,2±15%	0,72	0,013
0,3ВТ	24±15%	0,21±15%	0,7	0,008
0,37ВТ	29,6±15%	0,14±15%	0,7	0,01
0,44ВТ	35,2±15%	0,16±15%	0,7	0,008
0,7ВТ	56±15%	0,23±15%	0,7	0,007
0,9ВТ	72±10%	0,25±15%	0,8	0,006
1,3ВТ	104±10%	0,23±15%	0,8	0,006
1,5ВТ	120±10%	0,22±15%	0,75	0,005
1,7ВТ	140±10%	0,21±15%	0,75	0,005
2ВТ	160±10%	0,18±15%	0,8	0,006

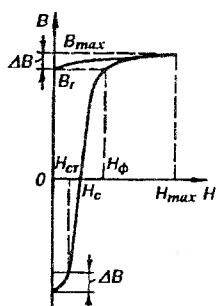


Рис. 17.21. Характеристики и параметры магнитных материалов в импульсном режиме перемагничивания

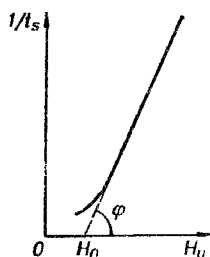


Рис. 17.22. К определению порогового поля импульсных сердечников

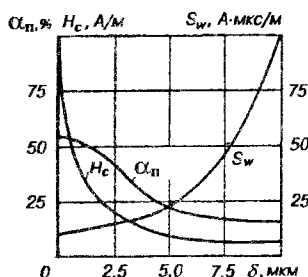


Рис. 17.23. Зависимости коэффициента прямоугольности, коэффициента переключения и коэрцитивной силы ленточных сердечников от толщины ленты

это стремлением повысить быстродействие запоминающих устройств за счет уменьшения времени перемагничивания t_s . Поскольку коэффициент переключения S_w для всех ферритов одинаков, а H_c незначительно отличается от H_0 , то согласно выражению

$$t_s = \frac{S_w}{H - H_0}$$

время перемагничивания уменьшается с увеличением H_c .

В последние годы разработаны новые термостабильные ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса для микромагнитопроводов, практически не изменяющие свои параметры в интервале температур $-60 \div +80^\circ\text{C}$ (табл. 17.20).

Т а б л и ц а 17.20
Параметры термостабильных ферритовых микросердечников

Марка	H_c , А/м	B_r , Тл	S_w , А·мкс/м	α_n
М100П	175	0,23—0,25	40—60	0,91—0,92
М101П	190	0,23—0,24	35—55	0,90—0,92
М102П	130	0,2	70	0,90—0,92

17.6. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В телефонии, измерительной технике и радио-технике часто требуются материалы с постоянной проницаемостью при малых намагничивающих полях, высоким приращением магнитной индукции при однополярном намагничивании, с повышенными значениями проницаемости и удельного сопротивления, высокой индукцией насыщения.

Магнитные свойства некоторых сплавов (перминвары, изопермы) с постоянной μ_r в диапазоне до 10^4 А/м приведены в табл. 17.21.

Большое распространение для изготовления импульсных и широкополосных трансформаторов получили ферриты марок 1500НМ1, 1000НМ3, 1100НМ1, 1000НН1, 350НН1, 300НН1 и сплавы типов 79НЗМ и 68НМ, обладающие высокими значениями проницаемости и приращений индукции при однополярном намагничивании, малым отношением B_r/B_s . Параметры используемых ферритов и сплавов для импульсных трансформаторов приведены соответственно в табл. 17.22, 17.23. На рис. 17.24 приведены петли гистерезиса сплавов 79НЗМ и 68НМ при различных режимах термообработки [17.11].

Особые требования предъявляются к материалам для реле. Здесь необходимо иметь высокую индукцию насыщения для надежного срабатывания; низкую B_r , а следовательно и H_c , для надежного отпускания; высокое удельное сопротивление для снижения времени срабатывания. Хотя совместить все требования в одном материале трудно, широкое распространение здесь нашли

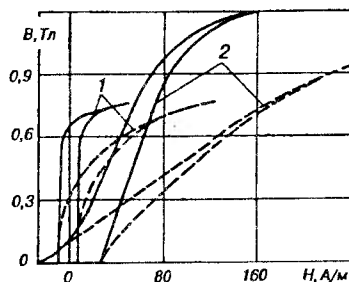


Рис. 17.24. Петли гистерезиса сплавов марок 79НЗМ (1) и 68НМ (2) при различных режимах термообработки: — быстрое охлаждение; ---- медленное охлаждение

Т а б л и ц а 17.21

Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и постоянством магнитной проницаемости (ГОСТ 10160-75)

Марка	Толщина, мм	$\mu_{гн}$		$\frac{\mu_{гmax}}{\mu_{гн}}$	$\alpha_{п}$ при 800 А/м	Температурный коэффициент магнитной проницаемости, $10^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при $-60 \div +120 \text{ } ^\circ\text{C}$
		Класс				
		I	II			
47НК	0,01—0,1	900	1100	1,15	0,05	0,06
47НКХ	0,02—0,1	1500	—	1,2	0,05	0,03
64Н	0,01—0,1	2500	2200	1,2	0,07	0,06
40НКМ	0,01—0,1	1800	—	1,2	0,07	—

Т а б л и ц а 17.22

Электромагнитные параметры ферритов для импульсных трансформаторов

Марка	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{гн}$ при $\tau = 3 \text{ мкс}$, $f = 5 \text{ кГц}$	Изменение $\mu_{гн}$, %, в интервале температур $-60 \div +85 \text{ } ^\circ\text{C}$	Рекомендуемый режим работы		
			H_n , А/м	f , МГц, не более	t_s , мкс, не менее
1500НМ1	1700	± 20	80	0,1	1,0
1000НМ3	1400	± 15	80	0,1	1,0
1100НМИ	1100	± 15	80	0,1	1,0
1000ННИ	1000	0—30	64	1	0,1
350ННИ	360	30—45	80	1	0,1
300ННИ	300	± 30	80—240	1	0,1
300ННИ1	300	± 10	80	1	0,1

Т а б л и ц а 17.23

Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплавов с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании, (ГОСТ 10160-75)

Марка	Толщина, мм	Относительная импульсная проницаемость $\mu_{гн} \cdot 10^{-3}$ при H		α_n при 800 А/м	Температурный коэффициент импульсной магнитной проницаемости, $10^{-4} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при $-60 \div +60 \text{ } ^\circ\text{C}$
		20 А/м	80 А/м		
79НЗМ	5	5	—	0,45	25
	10	7	—	0,30	25
	20	8	—	0,25	25
68НМ	20	—	6	0,20	25

сплавы 50НХС. Магнитные свойства сплава на этой основе приведены в табл. 17.24.

При построении магнитных систем микрофонов, магнитоэлектрических приборов, осциллографов и т.п. используется материал, называемый пермендюр. Индукция насыщения этого материала составляет 2,4 Тл. Отличительной особенностью пермендюра является то, что уже при 500—1000 А/м индукция в нем значительно превосходит индукцию всех других материалов. Магнитные свойства материалов с высокой индукцией насыщения приведены в табл. 17.25.

В некоторых случаях требуются термозависи-

мые магнитные материалы, например для компенсации температурной погрешности в измерительных приборах. Хорошими термомагнитными свойствами обладают сплавы никеля с медью (30—40 % медь, остальное — никель), называемые кальмаллоями. Характерной особенностью термомагнитных сплавов является линейная зависимость индукции от температуры. На рис. 17.25 представлена усредненная зависимость $(B_0 - \mu_0 H)$ сплава 32НХЮ от температуры при напряженности постоянного магнитного поля 6000—16 000 А/м.

Для получения мощных механических колебаний звуковой и ультразвуковой частот используют-

Таблица 17.24

Магнитные параметры холоднокатаной ленты сплава 50 НХС (ГОСТ 10160-75)

Класс	Толщина, мм	$\mu_{гk} \cdot 10^{-3}$	$\mu_{гmax} \cdot 10^{-3}$	$H_c, A/m$	$B_s, Tл$
I	0,005	1,0	8	56	1,00
	0,01	1,3	10	40	1,00
	0,02	1,5	15	20	1,00
	0,05—0,08	2,0	20	16	1,00
	0,1—0,15	2,5	25	13	1,00
	0,2—0,25	3,0	28	10	1,00
	0,35—0,5	3,2	30	8	1,00
	0,8—1	3,0	20	10	1,00
II	0,02—0,05	3,0	25	12	1,00
	0,1—0,25	3,1	28	10	1,00
	0,35—0,5	3,5	35	8	1,00

Таблица 17.25

Магнитные свойства холоднокатаных сплавов с высокой индукцией насыщения (ГОСТ 10160-75)

Марка	Вид продукции	Класс	Толщина или диаметр, мм	Индукция, Тл, при напряженности поля, А/м			Удельные потери, Вт/кг			$H_c, A/m$	μ_r
				400	2500	15 000	$P_{1,5/400}$	$P_{1,8/400}$	$P_{2,0/400}$		
27КХ	Листы или ленты	I	0,2	—	1,8	2,15	80	—	—	—	—
			0,35	—	1,8	2,15	110	—	—	—	—
			0,7	—	1,8	2,15	—	—	—	—	—
	Прутки и поковки	I	75—100	—	1,75	2,05	—	—	—	—	—
49К2ФА	Ленты и листы	I	0,1	—	2,2	—	—	—	—	140	5500
			0,2	—	2,2	—	—	—	—	120	5500
		II	0,05	1,8	2,1	—	—	25	30	40	—
			0,1	1,8	2,2	—	—	35	45	80	—
			0,15—0,2	1,85	2,2	—	—	39	55	48	—
			0,25—0,7	1,85	2,2	—	—	—	—	48	—
		III	0,1	2,0	2,2	—	—	25	30	30	—
			—	—	—	—	—	—	—	—	—
49КФ	Прутки и поковки	I	10—80	—	1,9	2,1	—	—	—	160	—
		II	10—80	—	2,0	2,2	—	—	—	160	—
49К2Ф	Ленты и листы	I	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	—
		II	0,2	—	—	2,25	—	—	—	160	700 при 0,8 А/м

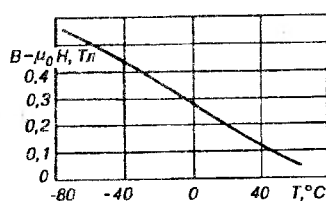


Рис. 17.25. Усредненная термомангнитная характеристика сплава марки 32НХЮ

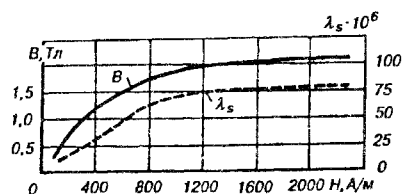


Рис. 17.26. Усредненные зависимости индукции и коэффициента магнитострикции от напряженности магнитного поля сплава марки 50КФ

ся магнитострикционные материалы. На их основе строятся магнитострикционные генераторы, элементы ультразвуковой аппаратуры в гидроакустике, линии задержки, приборы для определения глубины моря (эхолот), механические дробилки и др. Основными магнитными материалами здесь являются сплав железа с 14 % алюминия, никель

и сплав на основе железо—кобальт (50 % кобальта). Марки магнитострикционных сплавов НП-2-Т, 50КФ, 14НЮ регламентируются техническими условиями. На рис. 17.26 представлены усредненные зависимости индукции и коэффициента магнитострикции λ_s от напряженности магнитного поля сплава 50КФ.

17.7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитотвердые материалы после намагничивания должны создавать внешние постоянные поля, по возможности нечувствительные к различным возмущающим факторам. Необходимыми условиями здесь являются высокие значения остаточной индукции, коэрцитивной силы, малая проницаемость возврата и большой коэффициент выпуклости. Одним из основных оценочных критериев качества магнитотвердых материалов является энергетическое произведение $(BH)_{max}$, зависящее как от B_r и H_c , так и от характера кривой размагничивания, оцениваемого коэффициентом выпуклости

$$\beta = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}.$$

В существующих магнитотвердых материалах значение этого коэффициента находится в пределах 0,25—0,75. Относительная проницаемость возврата определяется как тангенс угла наклона к оси H прямой, соединяющей вершины цикла возврата (см. рис. 17.3). Чем больше μ_r возв., тем чувствительнее материал к дестабилизирующим факторам.

Большое распространение для изготовления постоянных магнитов получили литые сплавы ЮНДК, имеющие $H_c = 40 \div 200$ кА/м и $(BH)_{max} = 7 \div 80$ кДж/м³ при $B_r = 1,35 \div 0,65$ Тл.

На рис. 17.27—17.29 приведены кривые размагничивания различных марок сплавов этого типа. Зарубежными аналогами являются сплавы альнико, тикональ и альни. Магниты из этих сплавов применяются в электродвигателях, электроизмерительных, радиотехнических и других приборах.

В табл. 17.26 приведены параметры магнитотвердых материалов на железоникельалюминиевой основе легированной магнитотвердой стали согласно ГОСТ 17809-72.

В табл. 17.27 приведены температурные коэффициенты α_B магнитной индукции в точке максимума магнитной энергии для сплавов ЮНДК

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \Delta T},$$

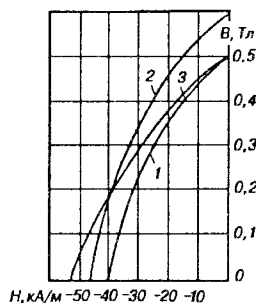


Рис. 17.27. Кривые размагничивания магнитотвердых материалов:

1 — ЮНД4; 2 — ЮНД8; 3 — ЮНД12

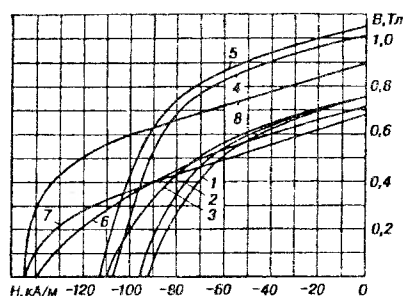


Рис. 17.28. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:

1 — ЮНДК35Т5; 2 — ЮНДК35Т5АА; 3 — ИНДК35Т5; 4 — ЮНДК3МТБА; 5 — ЮНДК35Т5АА; 6 — ЮНДК38Т7; 7 — ЮНДК40Т8; 8 — ЮНДК40Т8АА

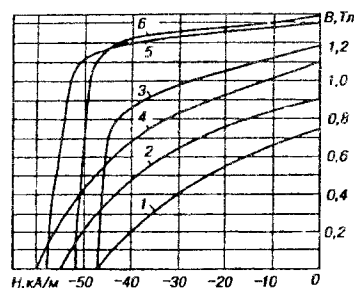


Рис. 17.29. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:

1 — ЮНДК15; 2 — ЮНДК18; 3 — ЮНДК24; 4 — ЮНДК24Т2; 5 — ЮНДК25БА; 6 — ЮНДК25А

Таблица 17.26
Материалы магнитотвердые литые
(ГОСТ 17809-72)

Марка	$(BH)_{max}$, кДж/м	H_c , кА/м	B_r , Тл	Отношение B/H в точке $(BH)_{max}$
				не менее
ЮНДК	7,2	40	0,50	12,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮН14ДК24	35	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	36	52	1,15	15,0—17,5
ЮН14ДК24Т2	30	60	1,00	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25	16,5—21,5
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5	36	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	36	135	0,75	4,5—5,5

Таблица 17.27

Температурный коэффициент сплавов ЮНДК

Материал	$\alpha_B, \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре, $^\circ\text{C}$						
	$-180 \div -80$	$-80 \div +20$	$20-200$	$200-300$	$300-400$	$400-500$	$500-600$
ЮНДК24	+0,015	-0,020	-0,15	-0,023	-0,030	-0,037	-0,044
ЮНДК25БА	+0,015	-0,020	-0,015	-0,023	-0,030	-0,037	-0,044
ЮНДК35Т5	+0,025	+0,025	-0,008	-0,015	-0,019	-0,024	-0,028
ЮНДК35Т5БА	+0,025	+0,025	-0,008	-0,015	-0,019	-0,024	-0,028
ЮНДК38Т7	+0,020	+0,020	-0,006	-0,011	-0,017	-0,022	-0,026
ЮНД4	+0,020	+0,020	-0,020	-0,026	-0,033	—	—

где ΔB — изменение индукции, вызванное изменением температуры на $\Delta T, ^\circ\text{C}$; B — магнитная индукция при начальной температуре.

Большой объем выпуска постоянных магнитов приходится на производство магнитов из бариевых ферритов, имеющих $H_c = 160 \div 200$ кА/м, $B_r = -0,2 \div 0,4$ Тл, $(BH)_{\max} = 6,0 \div 25$ кДж/м³. Кривые размагничивания их приведены на рис. 17.30. Широкое использование бариевых магнитов объясняется недефицитностью и дешевизной исходных материалов. Параметры основных марок изотропных нетекстурованных и анизотропных текстурованных бариевых ферритов приведены в табл. 17.28. Для материалов из феррита бария температурный коэффициент не зависит от положения рабочей точки и равен $-0,19\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

На рис. 17.31 приведены кривые размагничивания металлокерамических постоянных магнитов, выпускаемых отечественной промышленностью. Температурный коэффициент для металлокерамических материалов марок ММК1-ММК11 α_B составляет $0,035-0,048\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Из деформируемых высококоэрцитивных сплавов наиболее высокой H_c (до 430 кА/м) обладают кобальтплатиновые сплавы и кристаллические об-

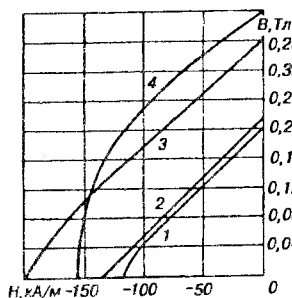


Рис. 17.30. Кривые размагничивания бариевых ферритов:
1 — 0,7 БИ; 2 — 1 БИ; 3 — 2 БА; 4 — 3 БА

Таблица 17.28

Магнитные свойства бариевых ферритов

Марка	B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{\max}$, кДж/м
6БИ240	0,19	125	6
16БД190	0,3	185	16

разцы, вырезанные из монокристаллов ($H_c = 568$ кА/м). Высокая пластичность платинокобальтовых сплавов позволяет изготавливать из них детали практически любой конфигурации. Высокая стоимость этих материалов органичивает применение их в широких областях. В нашей стране изготавливают платинокобальтовые сплавы ПЛК-76 и ПЛК-78 согласно ЦМТУ 07-77-67 в виде прутков и согласно ЦМТУ 07-82-68 в виде полос (рис. 17.32). Максимальной H_c (до 430 кА/м) обладает сплав приблизительно стехиометрического состава при $(BH)_{\max} = 75 \div 90$ кДж/м³. Температурный коэффициент α_B платинокобальтовых сплавов равен $-0,015\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Для изготовления малогабаритных магнитов и активной части гистерезисных двигателей распро-

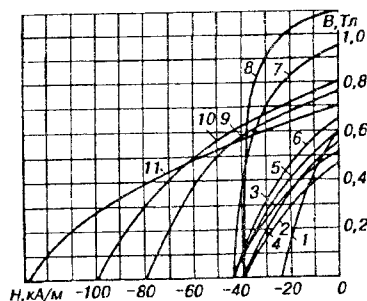


Рис. 17.31. Кривые размагничивания металлокерамических магнитов:
1 — 11 — ММК1 — ММК11

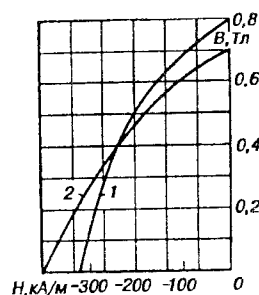


Рис. 17.32. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов:
1 — ПЛК76; 2 — ПЛК78

странение получили железокобальтованадиевые сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса.

Параметры прецизионных магнитотвердых сплавов регламентируются ГОСТ 10994-74 (табл. 17.29).

На рис. 17.33 представлены основные кривые намагничивания сплавов 35КХ4Ф, 35КХ8Д, 35КФ10Н.

В последние годы успешное развитие получили высококоэрцитивные материалы на основе соединений редкоземельных металлов и кобальта, имеющие намного большее значение энергетического

Т а б л и ц а 17.29
Железокобальтованадиевые магнитотвердые сплавы (ГОСТ 10994-74)

Марка	Основные параметры	Назначение
52К10Ф	Сплав с магнитной энергией 16—24 кДж/м ³ . В зависимости от содержания ванадия $H_c = 4,8 \div 32$ кА/м; $B_r = 1,2 \div 0,65$ Тл. Магнитные свойства приобретаются после холодной деформации на 70—90 % и последующего отпуска	Малогабаритные магниты, активная часть гистерезисных двигателей
35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф, 25КФ14Н, 35КФ10Н	Сплавы с заданными параметрами частной петли гистерезиса. Приобретают необходимые свойства после холодной деформации и отпуска. Сплавы 35КХ4Ф, 35КХ6Ф, 35КХ8Ф анизотропны. Сплавы 25КФ14Н, 35КФ10Н имеют прямоугольную петлю гистерезиса	Активная часть гистерезисных двигателей

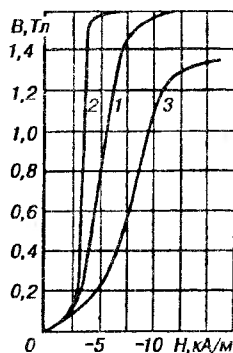


Рис. 17.33. Основные кривые намагничивания магнитных материалов для активной части гистерезисных двигателей:

1 — 35КХ4Ф; 2 — 35КХ8Ф; 3 — 35КФ10Н

Т а б л и ц а 17.30
Основные параметры магнитотвердых спеченных материалов (ГОСТ 21559-76)

Марка	B_r , Тл	H_c , кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м	H_{cM} , кА/м
КС37	0,77	540	110	1330
КС37А	0,82	560	130	1000
КСП37	0,85	520	130	800
КСП37А	0,90	500	145	640

Примечание. К — кобальт; С — самарий; П — празеодим; А — улучшенная структура.

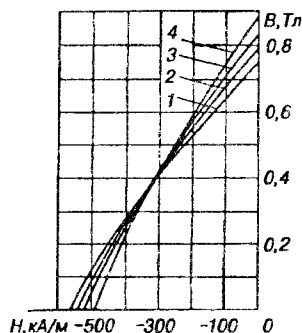


Рис. 17.34. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:

1 — КС37; 2 — КС37А; 3 — КСП37; 4 — КСП37А

произведения $(BH)_{max}$. Получают их по специальной технологии с применением сильных магнитных полей для текстурирования и высокого давления для прессования порошков. Параметры спеченных магнитотвердых материалов на основе сплавов редкоземельных элементов с кобальтом приведены в табл. 17.30.

Кривые размагничивания сплавов КС37, КС37А, КСП37 и КСП37А показаны на рис. 17.34.

В табл. 17.31 приведены значения температурного коэффициента магнитотвердых материалов на основе сплавов РЗМ-Со.

В настоящее время интенсивные исследования ведутся в области нового класса редкоземельных материалов на основе сплавов Nd—Fe—В, имеющих наибольший уровень максимального энергетического произведения $(BH)_{max}$ и остаточной индукции B_r . Однако, имея высокие показатели по магнитным параметрам, эти материалы обладают большим температурным коэффициентом α_B по сравнению с материалами на основе сплавов РЗМ-Со (табл. 17.32).

Т а б л и ц а 17.31

Температурный коэффициент α_B магнитотвердых материалов на основе сплавов РЗМ-Со

Соединение	x	$\alpha_B, \% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, при температуре, $^\circ\text{C}$			
		-100÷+20	20—100	100—200	-100÷+200
$\text{Sm}_x\text{Gd}_{1-x}\text{Co}_5$	0,47	0,005	0,005	-0,012	0,005
$\text{Sm}_x\text{Tb}_{1-x}\text{Co}_5$	0,3	0,005	-0,016	-0,022	-0,014
$\text{Sm}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Co}_5$	0,3	0,005	-0,014	-0,022	-0,013
$\text{Sm}_{x-1}\text{Er}_x\text{Co}_5$	0,2	0,007	-0,013	-0,024	-0,014
SmCo	0	-0,03	-1,04	-0,045	-0,036

Т а б л и ц а 17.32

Магнитные параметры и температурные коэффициенты магнитотвердых материалов на основе сплавов Na—Fe—В

Соединение компонентов, %					Магнитные параметры			Температурный коэффициент	
Nb	Dy	Fe	Co	B	H_c , кА/м	B_r , Тл	$(BH)_{\text{max}}$, кДж/м ³	α_B , $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Интервал температур, $^\circ\text{C}$
35,0	—	Основа	—	1,3	800	1,25	345	-0,120	20—120
35,0	—		9,0	1,3	480	1,24	320	-0,084	20—80
33,1	1,9		9,0	1,3	1100	1,21	322	-0,084	20—120

17.8. АМОРФНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ СПЛАВЫ

Внедрение новых материалов в значительной степени определяет научно-технический прогресс. Именно с применением аморфных магнитомягких сплавов (АММС) связывают будущее магнитных компонентов и различных устройств электротехники и электроники.

Пока не найдено других магнитных материалов, которые имели бы столь хорошие магнитные характеристики, обладали бы также и высокими электросопротивлением, твердостью, износостойкостью, коррозионной и радиационной стойкостью [17.7, 17.9]. Эти уникальные физико-механические и химические свойства определяются прежде всего тем, что у аморфных материалов, в отличие от кристаллических, отсутствует дальний порядок в расположении атомов, они не имеют дефектов, повышающих сопротивление движению границ доменов, в них отсутствует кристаллографическая анизотропия. Именно поэтому АММС характеризуются высокой магнитной проницаемостью, довольно высокой индукцией насыщения, а также малым значением H_c , не столь значительно зависящей от частоты перемагничивания, как аналогичные по составу кристаллические сплавы. Основной характерной особенностью АММС является то, что их удельные потери при перемагничивании вплоть до десятков килогерц крайне малы из-за высокого значения удельного сопротивления, малых значений H_c и толщины ленты.

Магнитные свойства АММС сильно зависят от режима термомагнитной обработки (ТМО). Так,

обработка одних и тех же сплавов в поперечном магнитном поле (ТМО $\perp$) позволяет получить АММС с пологой петлей гистерезиса с α_B , близким к 0, а ТМО в продольном магнитном поле (ТМО $\parallel$) — сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса с α_B , близким к 1. Это свойство АММС позволяет применять один и тот же сплав в зависимости от ТМО для различных устройств, например в дросселях фильтров и магнитных ключах.

К основным недостаткам АММС относится недостаточная термическая и временная стабильность, связанная с возможным спонтанным развитием кристаллизации сплавов. Кроме того, индукция насыщения и температура Кюри у аморфных сплавов АММС, как правило, ниже, чем у кристаллических, что связано с наличием в составах АММС так называемых амортизаторов — немагнитных металлов и металлоидов типа В, Si, Р, С и др. Так как аморфная структура является термодинамически неравновесной, то она в большей степени, чем кристаллическая, чувствительна к таким внешним воздействиям, как температура, давление, механические деформации.

Наиболее распространенным и имеющим наибольшее практическое значение методом получения аморфных материалов в большом количестве и виде, пригодном для непосредственного использования в технике, например в виде ленты (толщиной 10—50 мкм и шириной от 1 до 150 мм), является метод закалки расплава на поверхности быстро вращающегося охлаждаемого изнутри цилиндра.

17.9. КЛАССИФИКАЦИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

В зависимости от химического состава АММС разделяют на три группы:

- 1) сплавы на основе железа (аморфные стали);
- 2) железоникелевые сплавы;
- 3) железокобальтовые сплавы.

Кроме того, АММС часто подразделяют на материалы с высокой магнитной индукцией (как правило, аморфные стали) и материалы с высокой магнитной проницаемостью.

В табл. 17.33 приведены некоторые физические и электромагнитные свойства практически всех отечественных АММС [17.24]. Магнитные свойства отражают лишь некоторые усредненные параметры и могут отличаться в зависимости от режимов термообработки и пластических деформаций.

В табл. 17.34 приведены технические данные АММС.

Сплавы на основе железа. К ним относятся аморфная сталь марок 7421, 7411, сплавы 2НСР и 2ХСР. Эти сплавы разрабатывались для серийного

выпуска трансформаторов средней мощности промышленной и повышенной частоты. Они отличаются высокими значениями B_s и низкими удельными потерями $P_{уд}$ по сравнению с кристаллической электротехнической сталью. Сплавы этого подкласса не содержат остродефицитного кобальта и никеля. На сегодняшний день изделия на их основе освоены промышленностью. Ориентировочный диапазон частот применения 0,4—10 кГц. Основное применение: магнитопроводы силовых трансформаторов, строчные трансформаторы, дроссели.

Железоникелевые сплавы марок 10НСР, АМАГ 212, АМГ 225 обладают довольно высоким значением B_s , проницаемости и коэффициента прямоугольности, а также относительно малой H_c . Их свойства сравнимы со свойствами лучших марок пермаллоя типа 50 НП. Основное применение: магнитопроводы силовых трансформаторов преобразователей, высокочастотных магнитных усилителей, фазовращателей, магнитных модуляторов. Диапазон частот применения 5—50 кГц.

Железкокобальтовые сплавы — наиболее крупный подкласс АММС. В нем, в свою очередь, различают две подгруппы — сплавы с большим содержанием железа (24КСР, 30КСР, 9КСР,

Физические и магнитные свойства отечественных аморфных

Марка	$\mu_{гн}$	$\mu_{гmax}$	H_c , А/м	B_s , Тл	$\alpha_{n\perp}$, ТМО $\perp$	$\alpha_{n\parallel}$, ТМО $\parallel$	ρ , Ом·м·10 ⁶	γ , г/см ³
7421	—	—	15	1,61	0,2	0,6	1,2	7,31
7411	—	—	15	1,61	0,2	0,6	1,2	7,31
9КСР	—	—	15	1,61	0,2	0,6	1,3	7,3
2НСР	$(8 \div 12) \cdot 10^3$	$(10 \div 15) \cdot 10^4$	15	1,45	0,25	0,72	1,3	7,3
10НСР	$(3 \div 4) \cdot 10^3$	$(15 \div 20) \cdot 10^4$	10—14	1,5	0,2	0,8	1,3	7,3
2ХСР	$(8 \div 12) \cdot 10^3$	$(4 \div 6) \cdot 10^4$	3—5	1,3	0,15	0,8	1,3	7,3
24КСР	$(1,5 \div 2) \cdot 10^3$	$(5 \div 9) \cdot 10^4$	10—12	1,5	0,1	0,8	1,3	7,5
30КСР	$(1,5 \div 2) \cdot 10^3$	$(5 \div 9) \cdot 10^4$	8—12	1,48	—	0,7	1,3	7,5
71КНСР	$(20 \div 30) \cdot 10^3$	$(15 \div 20) \cdot 10^4$	0,8	0,5	—	0,92	1,35	7,5
84КХСР	$(20 \div 30) \cdot 10^3$	$(10 \div 30) \cdot 10^4$	1,2	0,58	—	0,92	1,16	7,5
84КСР	$(15 \div 20) \cdot 10^3$	$(5 \div 12) \cdot 10^4$	1,8	0,58	—	0,9	0,94	7,5
86КГСР	$(5 \div 7) \cdot 10^3$	$(15 \div 20) \cdot 10^4$	2,2	0,58	—	0,9	0,73	7,5
82К23СР	$(8 \div 15) \cdot 10^3$	$(20 \div 70) \cdot 10^4$	0,33	0,48	—	0,9	1,6	7,5
83К3ХСР	$(10 \div 20) \cdot 10^3$	$(50 \div 70) \cdot 10^4$	0,43	0,48	—	0,9	1,7	7,5
АМАГ 183	$(8 \div 12) \cdot 10^3$	$(30 \div 50) \cdot 10^4$	2,4	0,7	0,1	0,9	1,3	7,7
АМАГ 176	$(30 \div 50) \cdot 10^3$	$(50 \div 80) \cdot 10^4$	1,2	0,6	0,1	0,9	1,3	7,7
АМАГ 212	—	—	4,0	1,25	0,2	0,9	1,3	7,3
АМАГ 225	—	—	5,6	1,15	0,2	0,8	1,3	7,3
АМАГ 325	—	—	5,6	1,45	0,2	0,8	1,3	7,3

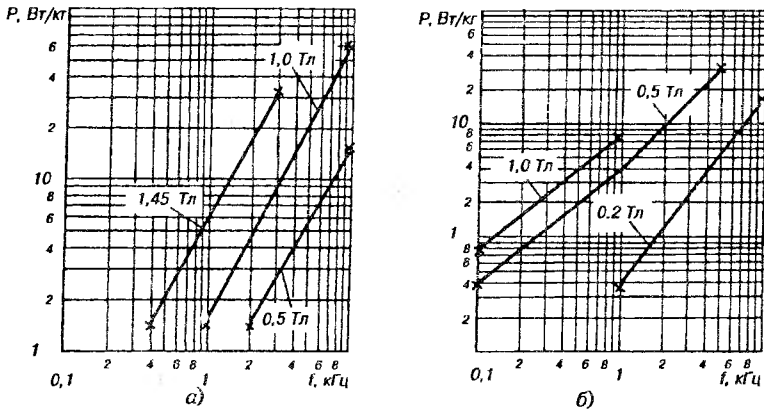


Рис. 17.35. Зависимость удельных потерь сплавов 7411 (а) и 7421 (б) от частоты перемагничивания (ТМО $\perp$)

АМАГ 325), сплавы, близкие по свойствам к АММС из железоникелевых сплавов. Применяются в тех же целях и в том же диапазоне частот, что и железоникелевые сплавы. Железкокобальтовые АММС с большим содержанием кобальта (71КНСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, 82К2ХСР, 823ХСР, АМАГ 176, АМАГ 183) обладают неболь-

шим H_c , высокой проницаемостью, имеют близкую к нулевой магнитострикцию, высокие значения коэффициента прямоугольности. Эти сплавы предназначены для работы на высоких (до 200 кГц) частотах, в высокочастотных силовых трансформаторах, магнитных ключах, магнитных экранах, магнитных головках, магнетометрах и т.д.

На рис. 17.35—17.50 приведены важнейшие характеристики АММС, которые могут дать достаточное представление о тенденциях, присущих всему классу.

Т а б л и ц а 17.33

магнитомягких сплавов

Точка Кюри T_c , °С	Температура кристаллизации T_k , °С	Диапазон температур применения, °С	$P_{уд}$, Вт/кг
370	510	-60÷+125	5(1,45 Тл/400Гц)
370	510	-60÷+125	5(1,45 Тл/400Гц)
460	550	-60÷+150	5(1,45 Тл/400Гц)
420	540	-60÷+125	10(0,2 Тл/20 кГц)
420	520	-60÷+130	8(0,2 Тл/20 кГц)
350	525	-60÷+125	10(0,2 Тл/20 кГц)
550	490	-60÷+125	8(0,2 Тл/20 кГц)
540	540	-60÷+120	—
150	530	-60÷+80	2(0,2 Тл/20 кГц)
250	530	-60÷+80	3(0,2 Тл/20 кГц)
340	540	-60÷+80	4(0,2 Тл/20 кГц)
450	460	-60÷+80	6(0,2 Тл/20 кГц)
100	580	-60÷+80	1(0,2 Тл/20 кГц)
150	570	-60÷+80	1(0,2 Тл/20 кГц)
350	525	-60÷+125	5(0,2 Тл/20 кГц)
350	525	-60÷+125	3(0,2 Тл/20 кГц)
435	530	-60÷+125	5(1,2 Тл/4000 кГц)
530	530	-60÷+125	5(1,2 Тл/4000 кГц)
535	415	-60÷+125	5(1,2 Тл/4000 кГц)

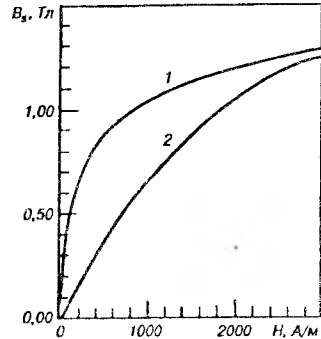


Рис. 17.36. Кривые намагничивания сплавов 7421 и 7411 в неотожженном состоянии (1) и после отжига в поперечном магнитном поле (2)

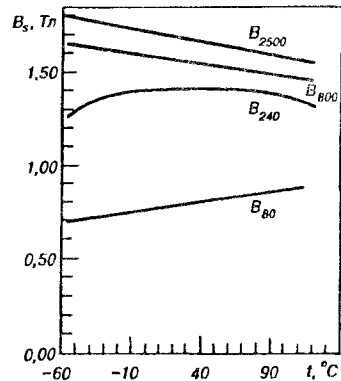


Рис. 17.37. Температурная зависимость магнитной индукции сплава 7421 при различной напряженности поля

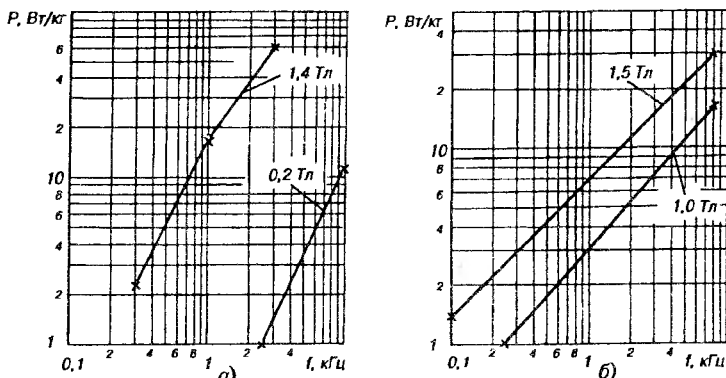


Рис. 17.38. Зависимость удельных потерь от частоты перемagnetизации сплава 9КСР после отжига α — TMO || ; β — TMO ⊥

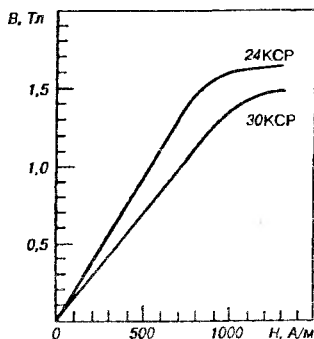


Рис. 17.39. Кривые намагнетизации сплавов 24КСР и 30КСР

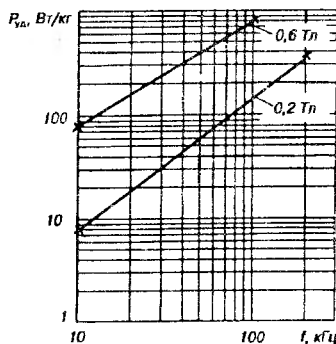


Рис. 17.40. Зависимость удельных потерь от частоты перемagnetизации сплава АМАГ 325

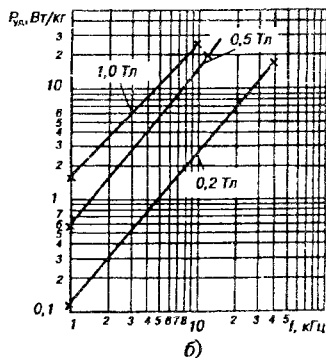
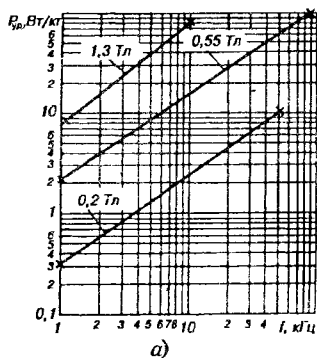


Рис. 17.41. Зависимость удельных потерь сплавов 2HCP (а) и 10HCP (б) от частоты перемagnetизации (TMO ⊥)

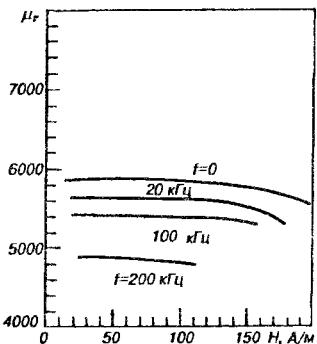


Рис. 17.42. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля сплава АМАГ 212

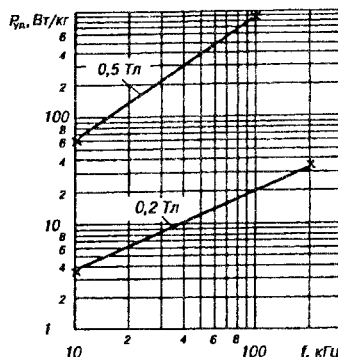


Рис. 17.43. Зависимость удельных потерь сплава АМАГ 225 от частоты перемagnetизации (TMO ||)

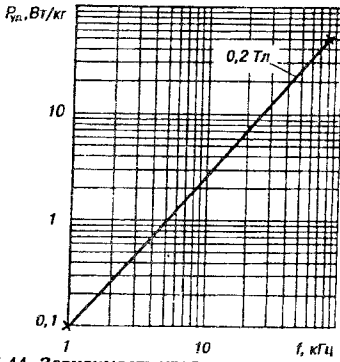


Рис. 17.44. Зависимость удельных потерь от частоты перемagnичивания сплава 71KHCP (TMO II)

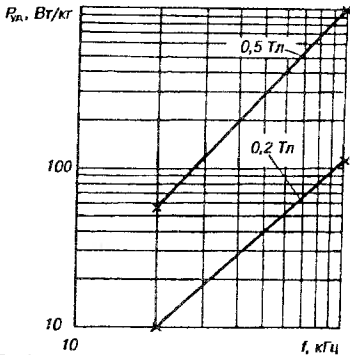


Рис. 17.46. Зависимость удельных потерь от частоты перемagnичивания аморфного сплава 84KHCP (TMO II)

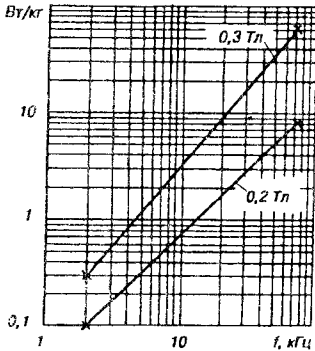


Рис. 17.48. Зависимость удельных потерь от частоты перемagnичивания сплава 82K3XCP

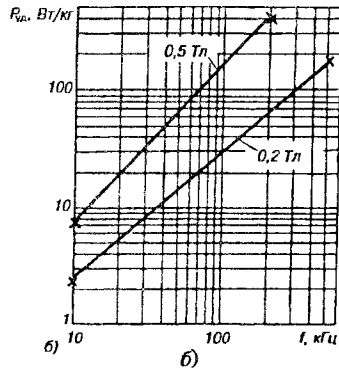
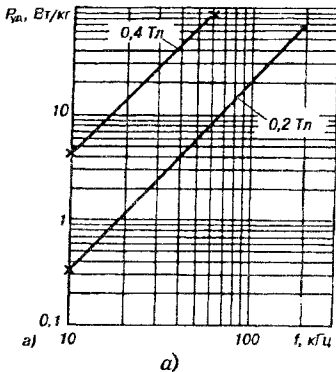


Рис. 17.50. Зависимости удельных потерь от частоты перемagnичивания сплавов АМАГ 176 (а) и АМАГ 183 (б) (TMO II)

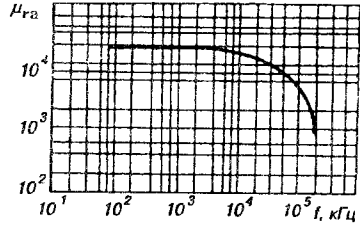


Рис. 17.45. Зависимость амплитудной магнитной проницаемости от частоты перемagnичивания сплава 71KHCP при H = 0,1 А/м

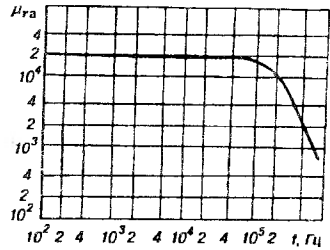


Рис. 17.47. Зависимость амплитудной магнитной проницаемости от частоты перемagnичивания сплава 84KHCP (TMO II) при H = 0,1 А/м

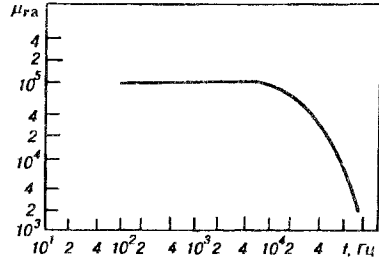


Рис. 17.49. Зависимость амплитудной магнитной проницаемости от частоты перемagnичивания сплавов 82K2XCP и 82K3XCP при H = 0,1 А/м

Т а б л и ц а 17.34

Технические данные отечественных аморфных магнитомягких сплавов

Марка	Технические условия	Ширина ленты, мм	Предельные отклонения по ширине, мм	Толщина ленты, мм	Предельные отклонения по толщине, мм	Длина ленты в рулонах, м, не менее	Диапазон частот применения, кГц
7431	14-1-3954-85	4—50	± 1	0,025—0,035	$\pm 0,005$	50	0,4—20
7411	14-1-4266-87	4—50	± 1	0,025—0,035	$\pm 0,005$	50	0,4—20
9КСР	14-1-3954-85	4—50	± 1	0,025—0,035	$\pm 0,005$	50	0,4—20
2НСР	14-1-3878-84	10, 20	± 1	0,02—0,025	$\pm 0,004$	50	1—30
2ХСР	14-1-4454-88	10, 20	± 1	0,02—0,025	$\pm 0,004$	50	1—30
24КСР	14-1-3730-84	10, 20	± 1	0,02—0,025	$\pm 0,004$	50	5—30
30КСР	44-1-4759-89	6,5; 8; 10; 12,5; 16; 20	± 1	0,022	$\pm 0,004$	100	5—30
71КНСР	14-1-3374-82	10, 20	1—2	$\pm (0,02 \div 0,035)$	$\pm (0,003 \div 0,006)$	100	10—100
84КХСР	14-1-4455-88	10, 20, 50	1—2	$\pm (0,02 \div 0,035)$	$\pm (0,003 \div 0,006)$	20, 50	10—100
84КСР	14-1-4455-88	10, 20, 50	1—2	$\pm (0,02 \div 0,035)$	$\pm (0,003 \div 0,006)$	20, 50	10—100
86КГСР	14-1-4455-88	10, 20, 50	1—2	$\pm (0,02 \div 0,035)$	$\pm (0,003 \div 0,006)$	20, 50	10—100
82К2ХСР	14-1-4455-88	5, 20	$+0,5 \div -1$	0,02—0,25	$\pm 0,003$	20, 50	40—200
82К3ХСР	14-1-4455-88	5, 20	$+0,5 \div -1$	0,02—0,25	$\pm 0,003$	20, 50	40—200
АМАГ 183	ЯеО.021.180 ТУ	0,7—20	$\pm 0,2$	0,015—0,025	$\pm 0,002$	20, 50	10—100
АМАГ 176	ЯеО.021.180 ТУ	0,7—20	$\pm 0,2$	0,05—0,025	$\pm 0,002$	20, 50	10—100
АМАГ 212	ЯеО.021.019 ТУ	1,6—6	$\pm 0,15$	0,015—0,02	$\pm 0,002$	20, 50	10—70
АМАГ 225	ЯеО.021.180. ТУ	0,7—20	$\pm 0,2$	0,015—0,02	$\pm 0,002$	20, 50	10—70
АМАГ 325	ЯеО.021.180 ТУ	0,7—20	$\pm 0,2$	0,015—0,02	$\pm 0,002$	20, 50	10—70

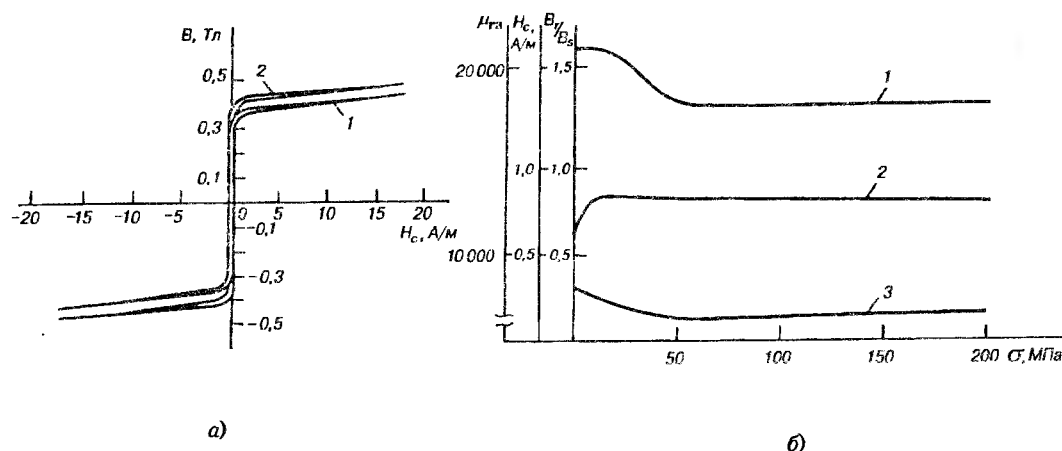


Рис. 17.51. Зависимость магнитных свойств сплава 71КНСР в закаленном состоянии от растягивающих напряжений:

а — петли гистерезиса при $\sigma = 0$ (1) и $\sigma = 170$ МПа (2); б — μ_r а (1), B_r/B_s (2), H_c (3)

Стабильность аморфных магнитомягких сплавов. Так как аморфная структура является термодинамически неравновесной, то она в большей степени, чем кристаллическая, чувствительна к таким внешним воздействиям, как температура, давление, механическая деформация. Вместе с тем АММС гораздо более радиационно стойки, нежели кристаллические сплавы.

На рис. 17.51 представлены зависимости магнитных свойств сплава 71КНСР после термообработки от растягивающих натяжений. Эти характеристики довольно точно отражают тенденции в изменении свойств и других АММС с максимальной проницаемостью — 84КХСР, 84КСР, 86КГСР, 82К2ХСР, 82К3ХСР, АМАГ 183, АМАГ 176. Другие АММС зависят от механических воздействий в меньшей степени. Изменение магнитных свойств материалов не выходит за пределы 10-15% в интервалах допустимых температур, указанных для каждого АММС в табл. 17.33. На рис. 17.37 представлены зависимости магнитной индукции от температуры сплава 2НСР, характерные и для других аморфных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 17.1. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. Л.: Энергия, 1970.
- 17.2. Хек К. Магнитные материалы и их техническое применение. М.: Энергия, 1973.
- 17.3. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974.
- 17.4. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1986.
- 17.5. Сергеев В.В., Булыгина Т.И. Магнитотвердые материалы. М.: Энергия, 1980.
- 17.6. Технология обработки высококоэрцитивных сплавов / Л.В. Худобин и др. М.: Энергия, 1978.
- 17.7. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / Под ред. Ц.Мацутото. М.: Металлургия, 1987.
- 17.8. Тикадзуми С. Физика магнетизма. Магнитные характеристики и практические применения: Пер. с японского / Под ред. Ц.Мацутото. М.: Мир, 1987.
- 17.9. Нуралиева Р.Д., Вербицкий О.Г. Аморфные магнитомягкие сплавы для устройств РЭА. Обзоры по электронной технике. Сер. В. Материалы. М.: ЦНИИЭлектротехника. 1984. С.2—47.
- 17.10. Ферриты и магнитодиэлектрики. Справочник / Под ред. Н.Д. Горбунова, Г.А. Матвеева. М.: Советское радио, 1968.
- 17.11. Прецизионные сплавы. Справочник / Под ред. В.В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.
- 17.12. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. М.: Энергия, 1980.
- 17.13. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т.3. Л.: Энергия, 1988.
- ГОСТ 503-81. Лента холоднокатаная из низкоуглеродистой стали. Технические условия.
- ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия.
- ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки.
- ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия.
- ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки.
- ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения.
- ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая тонколистовая анизотропная. Технические условия.
- ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая тонколистовая изотропная. Технические условия.
- ГОСТ 21427.4-78. Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная. Технические условия.
- ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки.
- ГОСТ 24063-80. Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры.
- ГОСТ 24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки.
- ГОСТ 24936-89. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие требования.
- ГОСТ 26530-85. Сплавы твердые спеченные безвольфрамовые. Марки.

Раздел 18

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

18.1. Общие сведения	393	18.5. Неразрушающий контроль сварных соединений	404
18.2. Приборы неразрушающего контроля. Дефектоскопы (394). Толщинометры (399). Приборы для контроля физико-механических свойств (401). Приборы для контроля электрофизических параметров (401).	394	18.6. Неразрушающий контроль качества в производстве	405
18.3. Неразрушающий контроль качества проводниковых и полупроводниковых материалов и изделий из них	403	Контроль качества в электромашино-, электроаппаратостроении и кабельной промышленности (405). Контроль качества в электронной промышленности и электроприборостроении (407).	
Контроль проводниковых и полупроводниковых материалов по удельной электрической проводимости (403). Дефектоскопия и контроль размеров проводников (403)		18.7. Методы автоматического определения работоспособности объектов в процессе их эксплуатации	409
18.4. Неразрушающий контроль качества изоляционных материалов и изделий из них	404	18.8. Математическое обеспечение систем диагностирования	410
		18.9. Аппаратурное обеспечение систем диагностирования	414
		Список литературы	416

18.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Контроль качества электротехнических материалов и изделий, называемых в дальнейшем объектами контроля (ОК), — это определение свойств, характеризующих пригодность ОК к использованию в соответствии с назначением. Контроль качества осуществляют непосредственным или косвенным определением параметров и характеристик ОК, а также определением тех свойств ОК и их составных частей, от которых зависят выходные характеристики и параметры ОК, их надежность и долговечность. К таким свойствам относятся, например, наличие или отсутствие нарушений сплошности материалов и деталей, физико-механические свойства (прочность, твердость, упругость, износостойкость и т.д.), надежность электрических и механических соединений, правильность сборки и электрического монтажа, правильность термообработки, толщина и свойства изоляционных, антикоррозийных и других покрытий. Для определения этих свойств используют методы разрушающего и неразрушающего контроля.

Разрушающий контроль (РК) применяется для выборочных испытаний отдельных образцов ОК, и по его результатам статистическими методами делается заключение о качестве партии ОК, к которой относятся испытываемые образцы. РК позволяет непосредственно определить контролируемые параметры или характеристики (например, предел прочности или толщину покрытия), но не дает полной уверенности в удовлетворительном качестве всей партии ОК. Кроме того, РК трудоемок и почти не поддается автоматизации.

Неразрушающий контроль (НК) не приводит к

разрушению или повреждению ОК, поэтому им может быть охвачено 100 % всех ОК в процессе их изготовления или эксплуатации. В отличие от РК НК обычно не дает прямой связи с контролируемыми параметрами, и для высокой достоверности результатов НК, как правило, требуется их выборочная проверка методами РК, выполняемая на стадии первоначального введения НК. РК также применяют как средство арбитражного контроля в сомнительных случаях. НК базируется на различных физических принципах и использует методы и средства, как правило, хорошо поддающиеся автоматизации, что позволяет создавать полностью автоматизированные комплексы контроля качества, резко повышающие производительность труда и дающие высокий экономический эффект.

Различают три основных направления использования НК: дефектоскопия, структуроскопия и толщинометрия. Дефектоскопия связана с обнаружением нарушения сплошности ОК; структуроскопия — с определением физико-механических, электрофизических и других свойств ОК; толщинометрия — с измерением геометрических параметров ОК. Методы НК группируются в девять видов НК по общности физических характеристик в соответствии с ГОСТ 18353-79 [18.1]: акустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающих веществ, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический.

Техническая диагностика (ТД) — отрасль науки и техники, исследующая техническое состояние объектов диагностирования, разрабатывающая и использующая методы и средства его определения. В зависимости от применяемого метода диагностирования используют те или иные признаки и (или)

параметры, представляющие собой качественные и (или) количественные характеристики, фактическое знание которых и характеризует техническое состояние объекта. Примером диагностического параметра служат амплитуды спектральных составляющих виброускорений, виброскорости или виброперемещений в отдельных точках турбогенератора на характерных частотах при виброакустическом методе технического диагностирования, а примером диагностического признака — содержание металлических примесей в смазочном масле при его техническом диагностировании методом спектрального анализа жидкостей.

Включаемая в техническую документацию номенклатура характеристик объекта должна содержать все необходимые диагностические признаки (параметры), достаточные для проведения тех видов диагностики, которые требуются как в условиях производства, так и в условиях эксплуатации объекта. Если значения диагностических параметров объекта не поддаются непосредственному измерению, их находят обработкой результатов измерений других параметров, связанных с искомыми известными функциональными зависимостями. Формализованные методы определения диагностических признаков (параметров) предусматривают построение и анализ математических моделей как объекта диагностирования и протекающих в нем процессов, так и моделей его возможных дефектов, а в ряде случаев и математическое моделирование условий эксплуатации.

Система ТД представляет собой совокупность объекта и средств диагностирования, устройств их сопряжения, а при необходимости и исполнителей, подготовленная к диагностированию или осуществляющая его по правилам, установленным соответствующей документацией. По характеру взаимодействия между объектом и средством диагностирования различают системы функционального и тестового диагностирования, но при необходимости они могут использоваться одновременно. Тестовое диагностирование осуществляется путем управления объектом в соответствии с алгоритмами диагностирования. Примером тестового диагностирования может служить оценка технического состояния подшипников электродвигателя путем измерения вибраций его корпуса при вращении ротора от внешнего привода, когда отсутствуют вибрации, вызванные магнитными причинами. В отличие от тестового функциональное диагностирование осуществляется во время функционирования объекта, на который поступают только рабочие воздействия и никакие другие воздействия со стороны средств диагностирования не допустимы. Системы диагностирования по степени охвата изделия могут быть локальными и общими; по степени автоматизации — автоматическими, автоматизированными и ручными; по используемым средствам — универсальными и специализированными, внешними и встроенными, аппаратными и программными средствами диагностирования.

К аппаратным средствам ТД относят различные устройства: приборы, пулты, стенды, линии

связи с объектом, специальные вычислительные и управляющие машины, встроенную аппаратуру к ним и т.п. Программные средства ТД представляют собой набор вычислительных и сервисных программ, а также программ документирования и отображения результатов измерений, архивирования данных и т.п. При этом используют программы, составленные исходя из требований технического диагностирования объекта, а также специальные программы, содержащие дополнительные операции по управлению объектом при тестовом диагностировании, требующем перерывов в выполнении объектом его рабочих функций.

Алгоритм технического диагностирования устанавливает состав и порядок проведения измерения при контроле объекта и правила анализа их результатов. Различают безусловные алгоритмы диагностирования, при которых порядок выполнения измерений фиксирован заранее, и условные алгоритмы, при которых порядок измерений определяется полученными ранее результатами.

Конечным этапом диагностирования является получение технического диагноза. Если диагноз составляется после выполнения всех измерений и проверок, предусмотренных алгоритмом, последний называется алгоритмом с безусловной остановкой. В алгоритмах с условной остановкой анализ результатов осуществляется после выполнения каждого элементарного измерения.

Как уже отмечалось, системы диагностирования предназначаются для решения одной или нескольких из следующих задач: проверки исправности, проверки работоспособности; проверки функционирования; поиска дефектов. При этом устанавливаются их основные области применения: при производстве изделий (в процессе их наладки и приемки), эксплуатации (при техническом обслуживании в процессе применения, хранения и транспортирования), а также при ремонте (перед и после него). Для каждой области применения с учетом надежности изделия и его составных частей, контролепригодности и восстанавливаемости, стоимости и трудоемкости ремонта и диагностирования должна быть назначена требуемая достоверность диагноза.

18.2. ПРИБОРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

ДЕФЕКТОСКОПЫ

Это наиболее распространенный вид приборов НК.

Принцип действия акустических дефектоскопов основан на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в ОК. Шире других применяются ультразвуковые эходефектоскопы (табл. 18.1). Структурная схема импульсного ультразвукового эходефектоскопа приведена на рис. 18.1. Пьезоэлектрический излучатель I служит для преобразования импульсов переменного напряжения в упругие ультразвуковые колебания, излучения их в ОК, приема отраженного от дефектов ультразвука и преобразования его в электрические сигналы.

Т а б л и ц а 18.1

Технические данные ультразвуковых дефектоскопов

Тип дефектоскопа	Глубина прозвучивания в стали, м	Мертвая зона в стали, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Примечание
УД2-12	6	1	170×280×450	8,4	Питание автономное и от сети
УД2-17	6	0,8	165×260×360	7	То же, а также предварительная настройка на 12 различных режимов работы

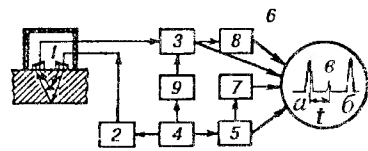


Рис 18.1. Структурная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа

Генератор 2 зондирующих импульсов вырабатывает радиоимпульсы напряжения для возбуждения излучателя искателя. Усилитель 3 состоит из усилителя высокой частоты и детектора. Синхронизатор 4 служит для обеспечения синхронной работы основных блоков дефектоскопа. Он одновременно запускает генератор 2 и генератор развертки 5, который вырабатывает линейно изменяющееся напряжение развертки электронно-лучевой трубки 6. На ее экране формируется изображение в виде трех импульсов: зондирующего а; донного б, соответствующего отражению ультразвука от «дна» ОК; импульса дефекта в, расположенного между первыми двумя. Измеритель 7 времени предназначен для измерения времени t распространения ультразвука до дефекта и обратно. Селектор 8 позволяет анализировать эхосигнал от дефекта по времени и по амплитуде. Блок 9 временной регулировки чувствительности служит для выравнивания амплитуд сигналов от дефектов, залегающих на разной глубине. Ультразвуковые дефектоскопы (УЗД) предназначены в основном для контроля объектов из металлов и сплавов, а также сварных соединений. Возможен также контроль пластиков, резины, стекла, фарфора, керамики, т.е. материалов с относительно высоким коэффициентом затухания ультразвука α (Нп/м), определяемым как расстояние, на котором амплитуда плоской акустической волны убывает в e раз. Важный параметр УЗД — максимальная глубина прозвучивания — обратно пропорционален α и

убывает с ростом частоты акустических колебаний. Второй важный параметр — мертвая зона (или минимальная глубина прозвучивания) — определяется минимальной глубиной залегания искусственного дефекта в виде цилиндра диаметром 2 мм, надежно выявляемого дефектоскопом. Третий параметр — чувствительность — определяется обычно порогом чувствительности, или предельной чувствительностью, — минимальными размерами искусственного отражателя ультразвука, который может быть обнаружен дефектоскопом. Мерой порога чувствительности служит площадь отверстия с плоским дном, ориентированным перпендикулярно акустической оси искателя. Порог чувствительности зависит от режима работы УЗД, материала и формы ОК, состояния его поверхности и обычно составляет несколько квадратных миллиметров. Поскольку максимальная глубина прозвучивания материалов с большим α у УЗД мала, то объекты из таких материалов контролируют акустическими дефектоскопами (АД), работающими в звуковом диапазоне частот (табл. 18.2). При работе с АД в отличие от УЗД не требуется акустического контакта с ОК через слой смазывающей жидкости (глицерин, масло, спирт), а используется сухой контакт.

Вихрековые дефектоскопы (ВД) основаны на регистрации электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой вихрекового преобразователя (ВТП) в электропроводящем ОК (табл. 18.3). Ток генератора высокой частоты возбуждает переменное магнитное поле обмоток ВТП, подключенных к нему. При взаимодействии поля с ОК в последнем возникают вихревые токи, плотность которых зависит от электрофизических и геометрических параметров ОК (в том числе от наличия и размеров дефектов). Магнитное поле вихревых токов, действуя на обмотки ВТП, меняет их полное комплексное сопротивление (в параметрическом варианте) или ЭДС (в трансформаторном варианте). Дефектоско-

Т а б л и ц а 18.2

Технические данные акустических дефектоскопов

Тип дефектоскопа	Объекты контроля	Порог чувствительности	Габариты, мм	Масса, кг
АД-42Н	Многослойные металлические конструкции, слоистые пластики, композиты	Диаметр дефекта 3 мм на глубине до 3 мм (под обшивкой из алюминиевых сплавов)	175×60×167	1,6
АД-42М	Конструкции из композитов, включая сотовые	Диаметр дефекта 3 см на глубине до 15 мм	200×105×50	1

Технические данные

Тип дефектоскопа	Вид ВТП	Объекты контроля	Порог чувствительности	Скорость контроля, м/с
ВД-87НСт	Накладной	Детали из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов	Поверхностная трещина глубиной 0,2 мм в ферромагнитном образце	—
ВД-87НД	То же вращающийся	То же и стенки отверстий	Поверхностная трещина глубиной 0,1 мм в ферромагнитном образце	—
ВД-89Н	Накладной, карандашного типа	Детали сложной формы из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов	Поверхностная трещина в образце из алюминиевого сплава глубиной 0,2 мм и длиной 5 мм	—
ВД-34П	Преходной	Проволока, прутки и трубы диаметром от 1,35 до 56 мм из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов	Трещина глубиной 10 % толщины стенки трубы, но не менее 0,3 мм	0,01 — 10

пы с проходными ВТП в виде одной или нескольких катушек, охватывающих ОК, применяют для высокопроизводительного контроля проволоки, шин, прутков, труб, а также шариков и роликов, подшипников качения, винтов и других ОК. Дефектоскопы с накладными ВТП в виде катушек, подносимых торцом к поверхности ОК, применяют для контроля плоских ОК (листы, ленты, пластины и т.п.), а также для контроля ОК более сложной формы. Используя устройства вращения накладных ВТП вокруг ОК или внутри него (сканирование поверхности ОК), контролируют наружные и внутренние поверхности труб, стенки отверстий и т.д. Учитывая малую глубину проникновения электромагнитного поля в металлы, ВД используют для обнаружения поверхностных и подповерхностных (на глубине нескольких миллиметров) дефектов. Основным параметр ВД — порог чувствительности, определяемый минимальными размерами дефекта заданной формы и положения, при которых отношение сигнал/помеха равно 2. Для ВД с проходными ВТП порог чувствительности определяется обычно глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженной в процентах поперечного размера (диаметра) ОК, а для ВД с накладными ВТП — абсолютными размерами дефекта [18.2, 18.3]. ВД не требует механического контакта ВТП с ОК, что позволяет реализовывать высокопроизводительный бесконтактный контроль.

Принцип действия *магнитных дефектоскопов* (МД) основан на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов при намагничивании ферромагнитных ОК.

Для регистрации полей рассеяния применяют магнитный порошок, магнитную ленту, феррозонды, преобразователи Холла, индукционные, магниторезистивные и магнитодиодные преобразователи. *Магнитопорошковые дефектоскопы* просты в устройстве и эксплуатации и применяются для контроля разнообразных ферромагнитных объектов

любой формы (табл. 18.4). ОК намагничивают пропуская через него импульс тока или помещением в магнитное поле катушки (или витка) с током. Для обнаружения дефектов поверхность ОК покрывают водной или масляной суспензией, содержащей магнитный порошок, который осаждается вблизи дефектов, образуя контрольный рисунок. Часто в суспензию добавляют люминофоры, которые дают повышение контраста рисунка при облучении источником ультрафиолетового излучения. Магнитопорошковые дефектоскопы позволяют обнаруживать поверхностные дефекты глубиной от 0,01 мм при ширине от 0,001 мм, а также подповерхностные дефекты. Порог чувствительности дефектоскопов зависит от состояния поверхности и однородности ОК. Этот вид дефектоскопов имеет наименьший порог чувствительности из всех видов дефектоскопов, применим только для контроля ферромагнитных объектов и плохо поддается автоматизации.

Магнитографические дефектоскопы основаны на регистрации магнитных полей рассеяния на магнитной ленте, наложенной на намагниченный ОК, с последующим считыванием информации с магнитной ленты магнитными головками и воспроизведением сигналов на осциллографическом индикаторе.

Дефектоскопы, использующие проникающие вещества, делятся на капиллярные и теческательные. *Капиллярная дефектоскопия* основана на выявлении невидимых или слабо видимых глазом поверхностных дефектов с помощью проникающих жидкостей (пенетрантов). *Дефектоскопия теческательным* основана на обнаружении утечек жидкости или газа через сквозные дефекты. При использовании люминесцирующих пенетрантов индикаторный рисунок, полученный после удаления излишков пенетранта с поверхности ОК и образованный пенетрантом, адсорбированным специальными проявителями из поверхностных дефектов, рассматривают в ультрафиолетовых лучах.

Т а б л и ц а 18.3
вихретоковых дефектоскопов

Допустимый зазор между ВТП и объектом контроля, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Примечание
0,2	170×270×350	9	—
0,5	170×270×350	9,2	—
0,1	180×90×40	0,8	Автономное питание
—	Электронный блок: 470×340×285; блок ВТП: 310×350×400; осциллограф 390×100×280	40	Для работы в поточных линиях

Т а б л и ц а 18.4
Технические данные магнитных дефектоскопов

Тип дефектоскопа	Область применения	Габариты, мм	Масса, кг
ПМД-87 (магнито-порошковый)	Контроль ферромагнитных деталей, сварных швов, стенок отверстий в полевых, лабораторных и цеховых условиях	280×543×424	60
МД-87П (магнито-порошковый)	Контроль крупногабаритных ферромагнитных деталей по частям, а также деталей без демонтажа узлов в цеховых и лабораторных условиях	600×650×360	100+17 (с принадлежностями)
МД-43К	Контроль поверхности резьбы и шестерен из ферромагнитных сталей	170×270×350	9

Оборудование для капиллярной дефектоскопии простое и состоит из комплекта дефектоскопических материалов, ультрафиолетового облучателя и некоторых вспомогательных устройств. Капиллярная дефектоскопия позволяет обнаружить весьма малые поверхностные дефекты в металлических (ферро- и неферромагнитных) и неметаллических (керамика, фарфор, пластики) объектах.

В радиационных дефектоскопах используют в качестве источников излучения рентгеновские трубки, радиоактивные изотопы и ускорители заряженных частиц. Для рентгеновской дефектоскопии применяют установки, состоящие из рентгеновской трубки, высоковольтного источника напряжения и

контрольной аппаратуры (табл. 18.5). При радиографическом способе регистрации результатов контроля используют фоточувствительную пленку (пленочная радиография) или обычную бумагу, на которой получают изображение с помощью полупроводниковых пластин (электрорадиография). В рентгенотелевизионных аппаратах (интроскопах) рентгеновское изображение преобразуется в видимое на экране телевизора с помощью специальных передающих электронно-лучевых приборов (табл. 18.6). Радиографический способ дает большую чувствительность и глубину контроля, а рентгенотелевизионный позволяет повысить оперативность контроля. Рентгенотелевизионные установки позволяют получить увеличенное в десятки раз изображение внутренней структуры ОК и поэтому широко используются аппаратуры (полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и т.д.). Наивысшую разрешающую способность, возможность послойного изучения структуры объекта контроля имеют рентгеновские вычислительные томографы, например микротомограф ВТ-50. Он позволяет контролировать объекты диаметром до 50 мм при разрешающей способности 25 мкм и габаритах 1700×1200×800 мм.

Дефектоскопы с радиоактивными источниками используют гамма-излучение и применяются в основном в качестве переносных и передвижных аппаратов при контроле труднодоступных мест ОК и в полевых условиях. В шланговых гамма-дефектоскопах источник излучения может выдвигаться из контейнера по шлангу-ампулопроводу на расстояние более 12 м. Дефектоскопы с радиоактивными источниками позволяют контролировать стальные ОК толщиной от 1 до 200 мм [18.2]. Для дефектоскопии ОК большей толщины применяют ускорители заряженных частиц (бетатроны, линейные ускорители, микротроны), дающие энергию излучения до нескольких десятков мегаэлектрон-вольт. Наибольшее распространение получили бетатроны — циклические ускорители электронов. Они используются для дефектоскопии массивных стальных ОК толщиной до 500 мм [18.2]. Следует иметь в виду, что применение любых радиационных дефектоскопов связано с повышенными требованиями к технике безопасности и часто требует специального оборудования помещений.

Радиоволновые дефектоскопы используют электромагнитные волны длиной от 1 до 1000 мм для контроля диэлектрических объектов (резина, пластмассы, теплоизоляционные материалы, бумага) [18.2].

Приборы теплового контроля находят широкое применение в электротехнике и радиоэлектронике для определения тепловых режимов оборудования, приборов и их элементов. К ним относятся термометры разных типов, термоиндикаторы и приборы бесконтактного измерения температуры и исследования температурных полей [18.2]. Термоиндикаторы, действие которых основано на изменении состояния, яркости или цвета

Т а б л и ц а 18.5

Технические данные рентгеновских аппаратов

Тип аппарата	Назначение	Размер фокусного пятна, мм	Максимальная толщина просвечивания по стали, мм	Габариты, мм	Масса, кг
РУП-100-10 (передвижной)	Контроль изделий из легких сплавов, пластмасс и стали, в том числе труднодоступных участков	1,1	10	1240×1055×1100	200
РУП-120-5-1 (портативный)	Контроль изделий из стали и цветных металлов и сплавов, пластмасс	2,2	25	1400×700×1300	75
РУП-400-5-1 (стационарный)	Контроль в лаборатории, оборудованной биологической защитой	7	120	1570×2000×950	600
ЭРГА-03 (электро-рентгено-графический)	Контроль сварных и паяных соединений, литых или пластической деформации	В зависимости от типа трубки	В зависимости от типа трубки	410×530×410	45
МИРА-2Д (импульсный)	Контроль деталей узлов и конструкций в труднодоступных местах	2—3	20	Пульта: 300×250×120 Рентгеновского блока: 460×120×230	15
ПРИМА-2 (импульсный)	То же	3,5	—	Пульта: 250×200×70 Рентгеновского блока: Ø 130×320; Блока питания: 350×200×200	15

Т а б л и ц а 18.6

Технические данные радиационных интроскопов

Тип прибора	Источник излучения	Разрешающая способность, линий/мм	Объекты контроля	Телевизионное увеличение, разы	Габариты, мм	Масса, кг
МТР-3И	Рентгеновский аппарат РУП-150-10-1	20	Элементы радиоэлектронной аппаратуры, тонкостенные и малогабаритные сварные детали из алюминиевых и магнитных сплавов толщиной 1—50 мм	1,5—30	Рентгеновского блока: 1700×1000×2000 Телевизионного блока: 750×500×1200	950 1000
ПТУ-38	То же	8	Тонкостенные сварные швы, паяные соединения	25	Рентгеновского блока: 1700×1000×2000 Телевизионного блока: 200×120×105	950
РИ-60ТК	Рентгеновский аппарат РАП-150/300-0,1	20	Литые детали, толстостенные сварные конструкции из алюминия, титановых сплавов и пластмасс и керамики	—	Рентгеновского блока: 774×1035×340	1200

свечения некоторых веществ при изменении температуры, используют для определения температурного режима радиоэлектронной аппаратуры и электротехнического оборудования в процессе ис-

пытаний. Они выпускаются в виде термокарандашей, термолаков, термopорошков и наносятся на ОК. Точность определения температур составляет единицы градусов Цельсия. Термоиндикаторы по-

звolyют запоминать распределение максимальных температур в процессе испытаний, они экономичны и удобны в эксплуатации [18.2].

К бесконтактным измерителям температур относятся *пирометры*, измеряющие температуру в точке, и *термовизоры* для анализа температурных полей [18.2]. Пирометры позволяют измерять температуру в пределах от 0 до 3500 °C с погрешностью в 1—2 % верхнего предела измерения с расстояния в несколько метров. Например, пирометр ИФ-10П измеряет температуру от 0 до 2500 °C с погрешностью 1 % + 1 °C, имеет габариты 250×80×160 мм и массу 1,5 кг. *Термовизоры* представляют тепловое поле ("тепловой портрет") ОК на телевизионном экране благодаря преобразованию инфракрасного излучения объекта в электрические сигналы и сканированию его поверхности специальной оптической системой. Разрешающая способность по температуре составляет 0,1—0,4 °C, диапазон измеряемых температур $-30 \div +700$ °C. Термовизоры ИФ-30ТВ, ИФ-50ТВ с диапазонами температур 20—800 и 0—400 °C соответственно выпускает МНПО «Спектр». Порог чувствительности 0,1 °C, поле зрения (30×30)°, масса около 20 кг. В нашей стране хорошо известны термовизоры фирмы AGEMA (Швеция) [18.2]. Для контроля изделий электронной техники выпускаются *тепловизоры* «Рубин», «Янтарь», «Радуга», а также *инфракрасный микроскоп*, дающие 10—40-кратное увеличение, имеющие геометрическую разрешающую способность от 15 до 150 мкм и тепловую 0,2—0,5 °C при габаритах камеры 60×40×40 мм, индикатора 50×30×30 мм и массе около 20 кг [18.2].

Электрические дефектоскопы основаны на регистрации электростатических полей или электрических параметров ОК. Отечественной промышленностью выпускается *электрический измеритель глубины трещин* в стальных ОК типа ИГТ-10НК, позволяющий обнаружить трещины глубиной от 0,5 до 50 мм по изменению электрического сопротивления участка ОК. Габариты прибора 90×150×180 мм, масса 2,8 кг. Для применения прибора необходим электрический контакт с поверхностью ОК. *Электроискровой дефектоскоп* предназначен для контроля сплошности изоляционных покрытий на электропроводящих ОК, например полимерных и эпоксидных защитных покрытий толщиной 0,35—4 мм на трубопроводах при скорости контроля до 0,25 м/с. Сквозные дефекты покрытий обнаруживаются электроискровым пробоем между металлическим основанием и щупом дефектоскопа. Габариты: блока контроля 215×285×115 мм, блока питания 150×140×90 мм, трансформатора: диаметр 90×410 мм, масса соответственно 2,5; 2,5 и 1,7 кг.

ТОЛЩИНОМЕРЫ

Акустические толщиномеры (табл. 18.7) позволяют измерять толщину металлических и неметаллических (стекло, пластмасса, керамика) ОК при одностороннем доступе к ним. Наибольшее распространение получили эхоимпульсные ультразвуковые толщиномеры, принцип действия кото-

рых основан на измерении времени между излученным и отраженным от «дна» ОК импульсами ультразвука. Выпускаются также автоматизированные толщиномеры, предназначенные для контроля толщины стенок труб в производственном потоке [18.2]. Для большинства типов ультразвуковых толщинометров необходим акустический контакт пьезопреобразователя с ОК, осуществляемый через слой смазки или с помощью жидкостной ванны (иммерсионный вариант).

Вихрековые толщиномеры (табл. 18.8) предназначены для измерения толщины любых диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях, а также для измерения толщины электропроводящих лент, листов, стенок труб, электропроводящих покрытий на диэлектрических основаниях.

Магнитные толщиномеры применяют главным образом для измерения толщины неферромагнитных покрытий (проводящих и непроводящих) на ферромагнитных основаниях (табл. 18.9). Преобладают толщиномеры двух типов: магнитоотрывные, которые измеряют силу взаимодействия постоянного магнита с ферромагнитным основанием, зависящую от толщины покрытия, и индукционные, измеряющие ЭДС индукции в катушке, зависящую от магнитного сопротивления магнитной цепи, связанного с толщиной неферромагнитного покрытия.

Оптические толщиномеры применяют для автоматического измерения диаметра проволоки, труб, толщины и ширины лент, полос и т.п. в производственном потоке. В них используется модуляция светового потока при изменениях геометрических параметров ОК. Световой поток или его вариации измеряются фотоприемником. Погрешность измерения обычно не превышает 1%, возможен контроль нагретых до 1200 °C объектов.

Для измерения диаметра проволоки используют *электрические емкостные приборы*, например измеритель диаметра проволоки ПИД-1. Диапазон измерения 80—110 или 130—160 мкм, погрешность 1,5% верхнего предела измерения.

В *радиационных толщиномерах* используется регистрируемое детектором ослабление или отражение объектом контроля ионизирующего излучения (табл. 18.10). В качестве источников излучения используются рентгеновские трубки или радиоактивные изотопы; а приемниками служат ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики и полупроводниковые детекторы [18.2]. Рентгеновские измерители толщины применяют для автоматического непрерывного измерения толщины металлической полосы и листа в процессе производства как в холодном, так и в горячем состоянии. Их применение позволяет автоматизировать процесс производства введением обратной связи, охватывающей технологическое оборудование. Для этих же целей применяют и радиоизотопные толщиномеры, однако чаще они используются для измерения толщины металлических покрытий на любых основаниях, если атомные номера материала покрытия и основания различаются на 2—3

Т а б л и ц а 18.7

Технические данные ультразвуковых толщиномеров

Тип прибора	Диапазон измерения толщины T , мм (по стали и алюминию)	Погрешность измерения, мм	Габариты, мм	Масса, кг
УТ-93П	0,6—1000	$\pm 0,1$ при $T=0,6 \div 300$ мм; $\pm (0,001T+0,1)$ при $T=100 \div 1000$ мм;	84×140×36	0,4
УТ-56Б	0,8—1000	$\pm 0,01T+0,1$	148×75×30	0,35

Т а б л и ц а 18.8

Технические данные вихретоковых толщиномеров

Тип прибора	Объект контроля	Диапазон измерения толщины T , мм	Погрешность	Габариты, мм	Масса, кг	Примечание
ВТ-50НЦ	Диэлектрические покрытия (лаки, краски, эмали) на неферромагнитных электропроводных основаниях	0,01—2,0	$\pm (0,03T+0,5)$ мкм	180×40×85	0,45	С автономным питанием
Радон	То же	0—75 (пять моделей)	± 1 % (инструментальная)	35×130×160 (без блока питания)	0,5	—
Изоскоп МП-3	»	0—1	± 1 % (инструментальная)	150×80×30	0,35	С микропроцессором и автономным питанием
Интримет ИТМ-11	Медный слой в отверстиях печатных плат диаметром 0,8; 1,0; 1,3 мм	0,005—0,05	± 5 мкм	250×200×150	3,5	—
Интримет ИТМ-12	То же диаметром 0,6—1,5 мм	0,005—0,05	$\pm (0,04T+3)$ мкм	260×250×80	3,5	Цифровой
Дермитрон D-3000	Диэлектрические покрытия на электропроводных неферромагнитных основаниях, электропроводные покрытия на диэлектрических основаниях, неферромагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	0—1	± 1 % (инструментальная)	432×305×102	6,8	С микропроцессором, принтером

Т а б л и ц а 18.9

Технические данные магнитных толщиномеров

Тип прибора	Диапазон измерения толщины T , мм	Погрешность измерения	Способ измерения	Габариты, мм	Масса, кг	Примечание
МТА-2М	Неферромагнитных покрытий на ферромагнитной основе 0—0,3	$\pm (2 \div 18)$ мкм в зависимости от T	Магнитоотрывной	85×35×60	0,23	В корпусе карманных часов
МТА-3М	Никелевых покрытий на ферромагнитной основе 0,002—0,024	$\pm 1,5$ мкм	То же	85×64×30	0,22	То же
Дельтаскоп МП-3	Неферромагнитных покрытий на ферромагнитной основе 0—1,2	± 1 % (инструментальная)	Индукционный	150×80×30	0,35	С микропроцессором и автономным питанием
МТ-50НЦ	То же 0,004—2,0	$\pm (0,03T+1)$ мкм	То же	180×40×85	0,5	С автономным питанием

Т а б л и ц а 18.10

Технические данные радиационных толщиномеров

Тип прибора	Источник излучения	Объекты контроля	Пределы измерения толщины T , мм	Приведенная погрешность, %	Габариты измерительного блока, мм	Масса измерительного блока, кг	Примечание
ИТХ-5736	Рентгеновская трубка	Холодная стальная полоса шириной до 1700 мм	0,3—12 (7 диапазонов)	1, но не менее 5 мкм	2000×400×1150	800	—
РИТ-4	То же	То же	0,1—12	0,2	2000×400×1150	800	С выходом на ПЭВМ IBM PC
ИТГ-5688	»	Горячая (до 1200 °С) металлическая полоса шириной до 1700 мм	0,1—12 (6 диапазонов)	1, но не менее 12 мкм	3100×560×2300	1300	—
Интрофлуор	»	Покрываются из золота; серебра на никеле или кобальте; никеля на стали или меди; серебра на меди и т.д.	0,001—0,005 (золото) 0,001—0,03 (никель)	5	300×350×400	30	С приводом предметного стола, телемонитором, ПЭВМ

единицы. К ним относятся отечественный ТПРУ-2, а также приборы фирм H.Fischer (ФРГ) и UPA Technology (США). Наиболее совершенный из них — Микродерм МП-800 состоит из базового прибора с микропроцессором, дисплея, принтера и четырех измерительных зондов. Он позволяет измерять толщину золота, серебра, никеля и других материалов на разных основаниях при разнице в атомных номерах покрытия и основания в 2 единицы. Прибор запоминает 14 градуировочных кривых (получаемых по трем или четырем точкам на образцах) для разных сочетаний материалов покрытия и основания, работает в диалоговом режиме, производит статистическую обработку серии измерений. Применяется для измерения толщины покрытия на участках минимальной площадью около 1 мм².

Рентгенофлуоресцентные толщиномеры применяют для измерения толщины тонких покрытий, в частности, из драгоценных металлов на любых основаниях. Они имеют малый диаметр зоны контроля (менее 1 мм) и используют характеристическое излучение материала объекта, облученного микрофокусной рентгеновской трубкой. В табл. 18.10 приведены в качестве примера характеристики прибора «Интрофлуор» фирмы ИНТРОН Плус, Москва.

ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Приборы этого типа называют еще структуроскопами, так как физико-механические свойства и характеристики ОК (твердость, прочность, пластичность и т.п.) тесно связаны с их структурой (размеры и форма зерна в металлах и сплавах, анизотропия) [18.2]. В табл. 18.11 приведены данные о вихретоковых и магнитных структуроскопах.

В акустических приборах используется связь физико-механических свойств ОК со скоростью распространения и затухания ультразвука. Они чаще всего используются для определения размеров зерна в металлах и сплавах, для обнаружения межкристаллитной коррозии, для определения упругих постоянных и т.д. [18.2].

Вихретоковые приборы используют для сортировки ферро- и неферромагнитных ОК по маркам, для контроля правильности режима термической и термохимической обработки деталей, для сортировки по твердости и т.д. [18.2]. Сортировка обычно ведется методом сравнения со стандартным образцом.

Магнитные приборы применяют для сортировки ферромагнитных ОК по твердости, размерам зерна, анизотропии свойств, содержанию примесей (например, углерода). Чаще других для этих целей используются коэрцитиметры, основанные на корреляции между коэрцитивной силой и контролируемыми параметрами ОК [18.2].

К электрическим приборам относятся термоэлектрические приборы, например, серии ТЭП-10К, предназначенные для сортировки металлов и сплавов по маркам (химическому составу). Приборы измеряют термоЭДС в диапазоне $-5 \div +5$ мВ между специально нагреваемым до 80—120 °С электродом и ОК. Габариты прибора 290×152×324 мм, масса 7,5 кг.

ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

К ним относятся измерители удельной электрической проводимости γ , диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\tan \delta$.

Вихретоковые измерители удельной электри-

Таблица 18.11

Технические данные приборов для контроля физико-механических свойств

Тип прибора	Вид контроля	Объекты контроля	Контролируемые параметры	Габариты, мм	Масса, кг
ВС-19П	Вихретоковый	Ферромагнитные прутки, трубы и мелкие детали диаметром 1—200 мм	Марка стали, качество термообработки, твердость	460×430×120	30
ВФ-30 ЭЦМ	То же	Стальной листовой прокат толщиной 0,08—0,4 мм	Контроль по твердости в диапазоне 40—80 HRC	Электронного блока 480×360×200; датчика 100×450×300	110 (общая)
ИКМ-02Ц	Магнитный	Ферромагнитные стальные и чугунные изделия произвольной формы	Качество термической и термохимической обработки через связь с коэрцитивной силой в диапазоне 0,005—100 А/см и магнитной индукцией в диапазоне 0—20 мТл	200×200×70	1

Таблица 18.12

Технические данные вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости

Тип прибора	Пределы измерения, МСм/м	Погрешность, %	Допустимый зазор между датчиком и ОК, мм	Диаметр зоны контроля, мм	Габариты, мм	Масса, кг
ВЭ-24НЦ	0,5—56	2	0,2	2	180×40×85	0,7
ВЭ-27НЦ	0,5—35 (три модификации)	2	0,2	1	190×35×90	0,7

Таблица 18.13

Технические данные измерителей диэлектрической проницаемости, выпускаемых Институтом механики полимеров (Латвия)

Тип прибора	Пределы измерения		Погрешность измерения, %		Минимальная площадь измерения, см ²	Минимальная толщина ОК, мм	Габариты, мм	Масса, кг
	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta$	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta$				
7004	1—6	0,01—0,05	5	20	—	—	270×275×175	5
7212	1—6	—	5	—	36	15	250×100×380	7

ческой проводимости позволяют бесконтактно измерять γ неферромагнитных проводниковых материалов: металлов, сплавов и графита (табл. 18.12); сортировать их по маркам по результатам термической и термохимической обработки; обнаруживать шлифовочные прижоги [18.2]. Все эти применения возможны благодаря корреляции между γ и химическим составом, структурой и наличием механических напряжений в ОК. Возможен контроль под слоем диэлектрического покрытия, смазки, оксида толщиной до 0,1 мм.

Для измерения электрофизических параметров диэлектриков ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ или комплексной диэлектрической проницаемости $\bar{\epsilon}_r$ в Институте механики полимеров (Латвия) выпускаются приборы с электро-

костными преобразователями (табл. 18.13) [18.6]. Эти приборы позволяют определять ϵ_r при одностороннем доступе к ОК с компенсацией влияния неровностей поверхности в пределах 0,1—0,3 мм.

Параметры слоев полупроводниковых структур контролируются приборами, разработанными в Физико-энергетическом институте АН Латвии и выпущенными опытными партиями Экспериментальным электронно-механическим заводом этого института. Эти приборы предназначены для измерения толщины и удельного электрического сопротивления полупроводниковых эпитаксиальных слоев (ПКП-2), сопротивления квадрата поверхности диффузионных структур кремниевых тиристор (СВА-3МС) и солнечных элементов (СВП-4) и

работают в восьмимиллиметровом диапазоне волн с рупорными излучателями и приемниками. Для измерения удельного сопротивления полупроводниковых пластин толщиной 0,3—1 мм диаметром более 1 мм в диапазоне 0,5—6 Ом·м с погрешностью 5% предназначены приборы с емкостными преобразователями, работающие на частотах 120—180 МГц (ВЕИС-2П и ВЕИС-3П). Приборы ВИИС-2П, ВИИС-3П, ВИИС-4 с индуктивными преобразователями, работающими на частоте 120 МГц, предназначены для контроля поверхностного сопротивления квадрата поверхности сильнолегированных низкоомных диффузионных слоев кремниевых силовых приборов в диапазоне 0,3—30 Ом и удельного сопротивления полупроводниковых пластин минимальной площадью 1 см² в диапазоне 10⁻⁷—2·10⁻² Ом·м с погрешностью 10%. Разработана также серия вихретоковых приборов для измерения толщины вакуумной металлизации и проводимости квадрата поверхности тонких (0,01—0,2 мкм) металлических покрытий на полимерных пленках и конденсаторной бумаге (ВИМП-1, ВИМП-2, ВИМП-3 и ВИМП-4).

18.3. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

КОНТРОЛЬ ПРОВОДНИКОВЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Удельная электрическая проводимость γ (или удельное сопротивление $\rho = 1/\gamma$) — важный и во многих случаях определяющий параметр проводниковых и полупроводниковых материалов. Удельное сопротивление медных и алюминиевых слитков, из которых изготавливают электрические провода и кабели, определяет сопротивление единицы длины последних, которое строго регламентируется техническими условиями. То же относится к проводам из сплавов высокого электрического сопротивления. Удельное сопротивление материала графитовых и медно-графитовых контактных щеток определяет их сопротивление, от которого зависит температурный режим их работы.

Значением ρ определяются свойства полупроводниковых материалов и структур. В тех случаях, когда можно получить образцы материалов в виде полюс, лент, проводов постоянного сечения и достаточно точных размеров, возможно измерение ρ или γ , например, с помощью двойных мостов. Однако такие образцы могут быть получены не всегда, они должны быть метрологически аттестованы по размерам. Кроме того, измерение дает среднее значение ρ или γ по всему образцу, не обнаруживая возможных вариаций ρ или γ по длине образца и по его сечению. Бесконтактное измерение γ или поверхностного сопротивления R_s (для тонких ОК) свободно от этих недостатков.

Для бесконтактного измерения γ проводниковых

материалов применяют вихретоковые измерители удельной электрической проводимости серии ВЭ (см. табл. 18.12). Они позволяют измерять γ с погрешностью 2—3% на участке ОК диаметром 10—20 мм при минимальной толщине ОК 1 мм, причем измерения возможны под слоем оксидов, окалины, масла, красок толщиной 0,1—0,3 мм.

Приборы серии ВЭ успешно применяются также для контроля и разбраковки проводниковых материалов и изделий из них по маркам сплавов. Эта задача возникает в тех случаях, когда есть вероятность ошибки в марке материала, из которого изготовлены детали ответственного назначения. Зная значения γ , соответствующие той или иной марке, можно определить марку.

Для измерения γ полупроводниковых материалов и структур в процессе производства полупроводниковых приборов применяют радиоволновые, вихретоковые и электроемкостные приборы [18.7]. С помощью радиоволнового прибора ПКП-2 измеряют полное комплексное сопротивление Z однородных кремниевых монокристаллов и пластин по отраженному сигналу на волне длиной 8 мм, а с помощью градуировочных кривых находят ρ , значения которого могут быть в пределах 10⁻⁶—10⁻¹ Ом·м. По значениям комплексного коэффициента пропускания трехсантиметровых волн через полупроводниковые пластины, определенного приборами типа СИМП, измеряющими в диапазоне 0,01—4 кОм, отдельно контролируют толщину и γ пластин. Параметры пластин можно измерить также приборами типов ВЕИС и ВИИС на частотах 120—180 МГц.

Приборы ПКП и СВП позволяют контролировать также параметры эпитаксиальных слоев на исходной полупроводниковой основе. Параметры диффузионных структур силовых кремниевых приборов, кремниевых и германиевых интегральных схем и кремниевых солнечных элементов контролируются радиоволновыми и вихретоковыми приборами на разных стадиях технологического процесса. Радиоволновые приборы серии СВП применяют для измерения поверхностного сопротивления R_s диффузионных слоев, например p^+-p -слоев силовых приборов, $p^+-p-n-p^+$ -структур. Значение R_s низкоомных диффузионных слоев кремниевых тиристорных структур определяют приборами типа ВИИС. Все описанные измерения выполняются с помощью предварительно построенных по образцам градуировочных графиков.

ДЕФЕКТОСКОПИЯ И КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ ПРОВОДНИКОВ

Для дефектоскопии проволоки, полых проводников обмоток мощных электрических машин, медных шин, контактных проводов и других проводников применяют вихретоковые, тепловые, акустические приборы НК. Дефекты проволоки из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) и сплавов обнаруживают вихретоковыми дефектоскопами. Контроль ведут в процессе перемотки

проволоки со скоростью до 3 м/с без снятия графитовой смазки. Прибор обнаруживает расслой (протяженные узкие трещины), возникающий при нарушении режима волочения проволоки на волочильном стане и приводящий к браку при спиральной замотке проволоки для изготовления подогревателей катодов электронных приборов и нитей ламп накаливания, а также к выходу из строя электровакуумных приборов из-за латекания воздуха в колбу прибора через трещины проволочных выводов.

Для непрерывного автоматического измерения диаметра проволоки применяют фотоэлектрические и электроемкостные приборы [18.2]. Вихретоковые приборы с накладными преобразователями применяют для бесконтактного непрерывного измерения ширины металлических лент.

18.4. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ

Для контроля сплошности изоляционных (диэлектрических) покрытий на проводящих поверхностях применяют электроискровые дефектоскопы, например «Крона-1РМ». Толщину диэлектрических покрытий на проводящих неферромагнитных объектах измеряют вихретоковыми толщиномерами ВТ-50НЦ. Толщиномеры типа «Дермитрон» позволяют измерять толщину диэлектрических покрытий на площадке менее 1 мм² (см. табл. 18.8).

Для контроля качества диэлектриков применяют электроемкостные измерители диэлектрической проницаемости (см. табл. 18.13), радиоволновые (СН-30АФ), радиационные (см. табл. 18.5, 18.6), акустические (см. табл. 18.1, 18.2) и тепловые дефектоскопы. По значениям относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r определяют качество изолирующих материалов, а также такие их физико-механические характеристики, как, например, прочность на изгиб. Радиоволновые приборы применяют для обнаружения расслоений и непроклеев в слоистых пластмассах и композиционных материалах на их основе, например в сотовых конструкциях на основе стеклопластиков [18.14]. Радиационные дефектоскопы применяют для контроля печатных плат (рентгенотелевизионные микроскопы), для обнаружения дефектов пропитки трансформаторов и заливки сложных корпусов битумным компаундом, для обнаружения отверстий и пор в пропитанной воском конденсаторной бумаге или полистирольной пленке (нейтронные радиографы).

Акустические дефектоскопы применяют для контроля физико-механических характеристик пластиков и композиционных материалов на их основе (дефектоскопы звукового диапазона типа АД, см. табл. 18.2), керамики, фарфора, стекла (ультразвуковые дефектоскопы, см. табл. 18.1). Например, ультразвуковые дефектоскопы применяют для контроля пористости фарфорового тела опорных стержневых изоляторов на напряжение 110 кВ по скорости распространения ультразвука при продольном прозвучивании [18.15]. Ультразвуковой контроль позволяет заменить трудоемкий и длительный процесс фуксинных проб, основанный на контроле глубины проникновения красящего вещества — фуксина в тело изолятора при выдержке последнего под высоким давлением в фуксиновой ванне в течение нескольких часов с последующим отрезанием образца от торца изолятора.

Тепловые дефектоскопы — радиометры и тепловизоры — применяют для контроля одно- и многослойных изделий из стеклопластика, пенопласта и других диэлектрических материалов, в том числе печатных плат, антенных обтекателей из радиопрозрачных материалов и т.д. [18.14].

18.5. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварные соединения широко применяются в электротехнической и электронной отраслях промышленности. От их качества зависит надежность многих видов приборов и оборудования.

Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений определяется многими конструктивными и эксплуатационными факторами. Так, например, при статической нагрузке и пластичном материале влияние размера непровара на потерю прочности примерно пропорционально относительному его размеру или площади. При малопластичном материале, а также при динамической или вибрационной нагрузке влияние дефектов усиливается.

Для контроля сварных соединений рекомендуются следующие виды НК: акустический, радиационный, магнитный, проникающими веществами.

Акустический контроль сварных соединений проводят с помощью универсальных дефектоскопов (см. табл. 18.1), как правило, эхометодом. Угол ввода акустических колебаний выбирают так, чтобы расстояние от искателя 1 до сварного шва было минимальным; направление акустического луча 2 — как можно ближе к нормали по отношению к сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальная. Искатель ведут по траектории 3, а для повышения надежности контроля в процессе сканирования искатель непрерывно поворачивают на угол $\varphi = 10 \div 15^\circ$ (рис. 18.2, б) и шов прозвучивают с двух сторон. Швы нахлесточных соединений контролируют со стороны основного листа однократно отраженным лучом (рис. 18.3). Швы контактной сварки проверяют эхометодом, а сварные точки — зеркально-теневым. При этом дефекты типа слипания не выявляются. Они могут быть обнаружены вихретоковыми дефектоскопами.

Радиационный контроль сварных соединений

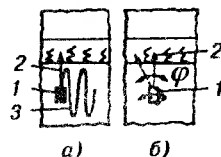


Рис. 18.2. Схема ультразвукового контроля стыкового сварного шва

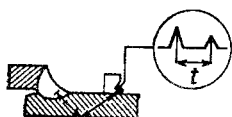


Рис 18.3. Схема ультразвукового контроля сварного шва нахлесточного соединения

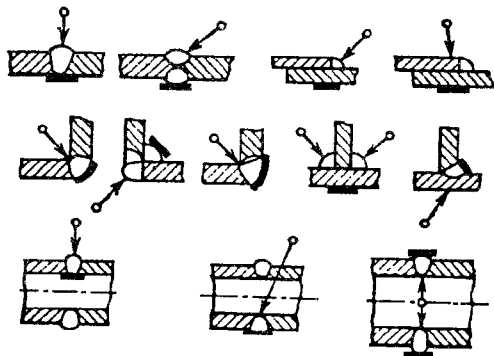


Рис 18.4. Схемы просвечивания сварных конструкций

регламентирован ГОСТ 7512-82. Используются рентгеновские дефектоскопы, гамма-дефектоскопы и ускорители (см. табл. 18.5, 18.6). На рис. 18.4 показаны некоторые стандартные схемы просвечивания сварных конструкций. Время просвечивания выбирают либо по номограммам экспозиции, либо с помощью автоматических экспонометров [18.2]. На снимках выявляются трещины и непровары, шлаковые включения, поры, газовые включения и другие дефекты. Относительный порог чувствительности контроля составляет 1—2%, или 10 пар линий на 1 мм. Для повышения надежности обнаружения дефектов применяют просвечивание одного участка шва с нескольких направлений.

Магнитный контроль сварных соединений используют для выявления дефектов ферромагнитных объектов. Наибольшее применение находит магнитографический метод контроля. Магнитографические дефектоскопы используются для контроля сварных швов трубопроводов и других ОК больших размеров.

Магнитопорошковый метод для контроля сварных швов применяют ограниченно, в основном для контроля швов, прошедших зачистку.

Капиллярные методы эффективны при контроле швов со снятым усилением и шероховатостью поверхности не ниже пятого класса. Швы с несколько большей шероховатостью можно контролировать люминесцентным методом, который имеет наивысшую чувствительность: обнаруживаются дефекты с шириной раскрытия 1—2 мкм и глубиной 10—15 мкм.

Контроль течениеметом применяется для проверки герметичности сварных соединений. При обнаружении утечек дефектные места заваривают после предварительной вырубки или высверливания, а затем испытание на герметичность повторяют.

18.6. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В ПРОИЗВОДСТВЕ

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В ЭЛЕКТРОМАШИНО-, ЭЛЕКТРОАППАРАТОСТРОЕНИИ И КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В связи с ростом мощности крупных электрических генераторов до 1000—1200 МВт возросли нагрузки на активные материалы. Замыкания листов стали сердечника статора превращаются в очаги недопустимых перегревов в работающей машине и поэтому должны быть обнаружены после сборки мощного турбогенератора. Для этой цели применяют специально разработанный тепловизор-дефектоскоп «Статор» (рис. 18.5) [18.9]. Он состоит из оптической головки 1 с круговым сканированием, установленной на самоходном шасси 2, блока 3 электроники и индикации и блока 4 электрохимической записи для получения термограмм. Оптическая головка устанавливается на радиальной телескопической опоре коаксиально с внутренней поверхностью статора и сканирует поверхность статора по окружности. Самоходное шасси шагами движется вдоль зубцов статора так, чтобы охватить всю его поверхность. Контроль всей поверхности статора занимает несколько минут. Разрешающая способность тепловизора по температуре не хуже 1 °С, линейная разрешающая способность 5—10 мм. Шасси перемещается со скоростью 0,6 м/мин по внутренней поверхности предварительно разогретого (индукционным током частотой 50 Гц) статора внутренним диаметром 0,9—3 м. Дефектные участки имеют температуру на несколько градусов выше средней, что фиксируется на термограммах. В настоящее время все выпускаемые заводами мощные генераторы подвергаются тепловизионному контролю. Результаты сопоставления термограмм, записанных при выпуске генератора, с термограммами, полученными при проведении капитального ремонта на электростанциях, позволяют судить о процессах старения межлистовой изоляции и изменении плотности запрессовки сердечника и могут служить основой для оценки ресурса машины.

Другая важная проблема при изготовлении мощных турбо- и гидрогенераторов — контроль качества изоляции стержней обмоток статоров. Для этих целей используются радиоволновые дефектоскопы СД-12Д, СД-12К с длиной волны 30 мм и СН-30П с длиной волны 8 мм. Они позволяют обнаруживать неоднородности изоляции, вызван-

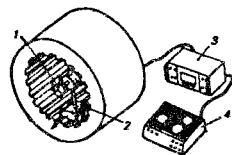


Рис 18.5. Схема контроля сердечника статора мощного электрического генератора тепловизором «Статор»

ные ее отслоением от меди проводников или расслоением.

В производстве электротехнической стали находят применение неразрушающие методы контроля ее свойств. Основные измерения характеристик и параметров стали выполняются известными методами выборочно на образцах, вырезанных из листов или рулонов стали. Однако это не гарантирует необходимого уровня качества всей продукции и требует больших трудозатрат. Поэтому очевидна актуальность использования НК для решения этой задачи.

Магнитный текстурометр, разработанный в Институте физики металлов Уральского отделения РАН, применяется на ряде металлургических заводов для непрерывного контроля кристаллографической текстуры движущейся полосы анизотропной высококачественной электротехнической стали марок 3411, 3414, 3415 [18.10]. Контролируемая лента проходит между полюсами П-образных электромагнитов, обмотки которых питаются током промышленной частоты. Измерительные катушки устанавливаются над контролируемой лентой так, чтобы измерять составляющую намагниченности, перпендикулярную приложенному магнитному полю. Лист намагничивают под углом $22-30^\circ$ к направлению прокатки. Сигналы измерительных катушек усиливаются, интегрируются, детектируются и записываются самописцем. Применение текстурометра позволяет обнаруживать участки полосы с плохой и неоднородной текстурой, у которых параметр B_{2500} (магнитная индукция при $H=2500$ А/м) выходит за допустимые пределы.

Для контроля механических напряжений в листах трансформаторной стали, вызывающих, как известно, изменение ее магнитных свойств, в Липецком политехническом институте разработан магнитный прибор с накладным датчиком [18.11]. Регистрируя переменное напряжение измерительной катушки, установленной в зазоре между магнитопроводом возбуждающей катушки и контролируемым листом, судят об уровне механических напряжений в листе. Внедрение прибора на Новолипецком металлургическом заводе позволило оперативно обнаруживать остаточные внутренние механические напряжения в трансформаторной стали, вызываемые нарушениями режима отжига и увеличивающие удельные потери в стали.

Для обеспечения высокой надежности электромагнитных реле применяют НК их деталей и узлов, а также готовых изделий. Например, листы из тугоплавких металлов, применяемых для изготовления контактов реле, контролируют вихретоковыми дефектоскопами типа «Лист» с вращающимися накладными преобразователями. Для обнаружения расслоений в вырубленных из этих листов контактах используют специализированный вихретоковый дефектоскоп с проходным преобразователем, через который контакты пролетают, высypаясь из бункера по желобу. Реле в сборе контролируют рентгеновскими методами. При контроле малогабаритных реле с помощью рентгенотелевизионного

интроскопа МТР-3И (см. табл. 18.6) обнаруживают следующие дефекты: обрыв обмоток, плохую пайку выводов, сваривание контактов, неплотное прилегание контактов, прогибы контактных пластин, деформации пружин.

Рентгеновский вычислительный микрофотограф ВТ-50 успешно применяют для исследования внутренней структуры электролитических конденсаторов, композиционных материалов (стеклотекстолита и др.), электродвигателей, лопаток турбин [18.16].

Приборы НК эффективно применяются при динамических испытаниях электрических машин в процессе их доводки. Механическое состояние ротора и механические факторы коммутации коллекторных машин — профиль коллектора, общее биение его поверхности, параметры вибрации элементов щеточно-контактного узла и другие параметры, характеризующие качество коммутации и динамическую устойчивость ротора и коллектора, успешно контролируют вихретоковыми приборами НК.

Рис. 18.6 иллюстрирует принцип действия прибора типа «Профиль» для контроля механических факторов коммутации и механического состояния роторов коллекторных электрических машин [18.12]. Вихретоковые накладные преобразователи (ВТП) 1 и 2 устанавливаются с некоторым «зазором безопасности» над двумя соседними пластинами 3 и 4 коллектора 5. Импульсы сигналов, амплитуды которых пропорциональны зазору между пластинами и ВТП, поступают от последних в электронный блок 6, на выходе которого включены осциллографический индикатор 7 и аналоговый регистратор 8. Разность ΔA амплитуд импульсов ВТП характеризует профиль коллектора, а разность амплитуды A импульса одного из ВТП и ΔA пропорциональна биению коллектора без учета его профиля.

Синхронизация развертки и осциллографического индикатора 7 с вращением ротора достигается вихретоковым датчиком 9 синхронизации, установленным над металлической пластиной 10, наклеенной на ротор. Для определения амплитуд вибрации элементов щеточного узла ВТП устанавливают над соответствующим элементом. В приборах «Дельта» и «Пик-2М» используется тот же принцип измерения, но применен дифференциальный ВТП, заменяющий два ВТП прибора «Профиль».

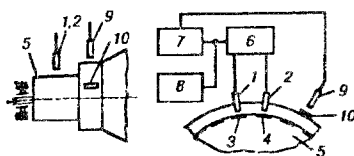


Рис 18.6. Схема контроля механических факторов коммутации роторов коллекторных электрических машин вихретоковым прибором «Профиль»

Технические данные прибора «Дельта»

Чувствительность к зазору на экране осциллографа индикатора, мм/мкм	Не менее 1
То же по выходу на гальванометр светолучевого осциллографа, мА/мкм	2,5
Погрешность измерения выступания ламелей коллектора, %	10
Максимальный зазор между ВТП и поверхностью коллектора, мкм	300
Минимальная ширина контролируемых ламелей, мм	1
Минимальный зазор между пластинами коллектора, мм	0,5
Диапазон частот следования ламелей, Гц	30—30 000
Допустимая температура коллектора, °С	200
Габариты, мм:	
ВТП:	
диаметр	20
длина	85
электронного блока	360×180×300
Масса, кг	8

Для автоматизации процесса контроля разработана система аттестации коллекторных электрических машин [18.12]. В ней применяются семь ВТП. Система позволяет контролировать и регистрировать следующие параметры: общее биение поверхности коллектора; относительное выступание соседних пластин; максимальный перепад между соседними пластинами коллектора за один оборот ротора; среднеквадратическое отклонение перепада соседних ламелей; овальность и эксцентриситет коллектора; частоту вращения вала ротора; разность частот вращения вала в два последовательных момента времени; параметры вибрации элементов конструкции в четырех точках.

Все описанные приборы и устройства применяются также для контроля механического состояния моторов электрических машин. В этом случае ВТП устанавливают над зубцами ротора.

Для бесконтактного оперативного контроля биения поверхности коллектора или ротора применяется пробник типа ИФК-3 (рис. 18.7) [18.12]. При испытаниях пробник подводится к контролируемой поверхности до упора стопором в деталь, относительно которой необходимо контролировать биение. Результаты измерения отображаются на экране осциллографа.

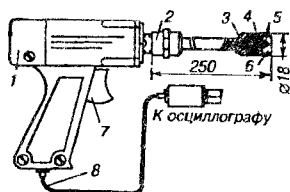


Рис 18.7. Вихретоковый пробник ИФК-3 для контроля биения поверхности коллекторов или ротора электрических машин:

1 — корпус; 2 — соединитель; 3 — шуп; 4 — магнитопровод ВТП; 5 — вставка; 6 — обмотка ВТП; 7 — выключатель; 8 — кабель

Для обеспечения высокого качества и надежности силовых кабелей и кабелей связи применяют различные виды НК. Для автоматического измерения диаметра жил кабелей применяют оптические (фотоэлектрические) приборы, а также приборы с контактными индуктивными датчиками. Дефекты в жилах кабелей могут быть обнаружены вихретоковыми дефектоскопами с проходными преобразователями.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭЛЕКТРОПРИБОРОСТРОЕНИИ

В связи с быстрым ростом сложности, миниатюризации и функциональной значимости электронной аппаратуры возникли большие трудности обеспечения ее качества и надежности. Традиционные статистические методы оценки качества и надежности требуют большого числа выборок и длительных испытаний и дают только вероятностные характеристики. В повышении качества и надежности важная роль принадлежит НК.

Рентгеновские методы НК позволяют обнаружить дефекты в электронных элементах и аппаратах, а также выявлять потенциально ненадежные элементы и детали, которые могут вызвать отказ аппаратуры. Хорошие результаты дает применение рентгенотелевизионных интроскопов, например МТР-3И (см. табл. 18.6), для контроля полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также печатных плат и печатных узлов, реле, конденсаторов и резисторов. В гибридных и полупроводниковых интегральных микросхемах обнаруживаются следующие дефекты: обрывы, КЗ и пережоги выводов транзисторов, нарушение топологии, прогиб и негерметичность корпуса. В полупроводниковых диодах, стабилитронах и транзисторах выявляют: обрывы внутренних соединений; перекосы пружин относительно корпуса; КЗ выводов; расплавление кристалла и пережоги выводов; наличие посторонних частиц; прогибы и трещины корпуса; уменьшение сечения внутренних выводов.

Рентгенографический способ применяют для обнаружения металлических включений размером 10—20 мкм в изолирующих керамических слоях многослойных цилиндрических металлокерамических изделий, применяемых в электронной промышленности. С помощью рентгенотелевизионного интроскопа МТР-3И можно обнаружить дефекты многослойных печатных плат; КЗ между дорожками из-за недотравления или растекания припоя между слоями; уменьшение и увеличение ширины дорожек, их разрывы; отсутствие и неравномерность покрытия припоем или серебром; расслоения диэлектрика и отслоения дорожек; смещение контактных площадок относительно отверстий. Возможен контроль печатных плат с числом слоев до 16.

Для обеспечения высокого качества и надежности печатных плат, особенно многослойных, необходимо контролировать толщину металлизации отверстий в них, как монтажных, так и соединительных. Слой меди в отверстиях должен иметь

толщину 25 мкм. При его уменьшении до 5 мкм резко снижается надежность соединений из-за возможного пережога при пайке, разрушения при окислении в процессе эксплуатации, снижения механической прочности. Увеличение толщины слоя до 40—50 мкм приводит к рыхлоте покрытия. Для контроля толщины покрытия применяют выборочные весьма трудоемкие и дорогие разрушающие испытания. Для неразрушающего измерения толщины металлизации отверстий применяют электрические (контактные) и вихретоковые (бесконтактные) приборы. Приборы типа «Кавидерм» измеряют контактным способом электрическое сопротивление трубки металлизации и пересчитывают его в значение толщины покрытия. Для тех же целей применяют вихретоковые измерители толщины металлизации ИТМ-11 и ИТМ-12 (см. табл. 18.8), позволяющие контролировать толщину медного покрытия в отверстиях печатных плат как до травления рисунка проводников, так и после. Контроль толщины металлизации до травления рисунка позволяет обнаружить брак на ранних стадиях технологического процесса, что невозможно при использовании электроконтактных приборов типа «Кавидерм».

Качество печатных плат, особенно многослойных, проверяется ультразвуковыми дефектоскопами. На дефектограммах обнаруживаются расслоения и пустота в диэлектрике, отслоение проводников от диэлектрика, посторонние включения и т.д. Толщину проводников на плоских поверхностях печатных плат контролируют радиационными толщиномерами типа «Микродерм» (см. §18.2) и близкими к нему по характеристикам приборами типа «Фишерскоп» фирмы Н. Fischer (ФРГ).

Для измерения толщины покрытий из золота, серебра, палладия, родия и других драгоценных металлов на печатных платах, корпусах интегральных схем, электрических контактах разъемов применяют рентгенофлуоресцентные толщиномеры, в частности «Интрофлуор» (см. табл. 18.10).

Для контроля электронных элементов узлов и изделий широко применяются тепловые методы. Многие дефекты, ошибки в монтаже электронных узлов, не сразу определяемые по электрическим характеристикам аппаратуры, вызывают изменения ее температурных полей. По результатам анализа тепловых полей можно обнаружить ошибки в номиналах параметров элементов, обрывы и КЗ в них, оценить эффективность теплоотвода от тепло выделяющих элементов. Тепловые поля регистрируют контактными методами с помощью термомпар, терморезисторов и термоиндикаторов (см. §18.2) или с помощью тепловизоров. Для поиска неисправностей с помощью тепловизоров применяют метод образцовых термограмм или метод изотерм [18.2]. Образцовую термограмму получают на заведомо исправном объекте и с ней сравнивают термограммы контролируемых объектов. Метод изотерм позволяет количественно определить температуру отдельных участков объекта контроля с погрешностью около 0,2 °С.

Качество паяных и сплавных соединений сило-

вых полупроводниковых приборов проверяют ультразвуковыми методами. Обнаруживают дефекты типа непропаев и пор диаметром более 1 мм в паяных соединениях кремний-вольфрам.

Качество электровакуумных приборов в значительной степени зависит от герметичности соединения баллона с металлическими выводами, которые обычно изготавливаются из специальной проволоки — платинита. Платинит представляет собой никелевую проволоку, покрытую слоем меди, толщина которого выбрана так, чтобы температурные коэффициенты расширения платинита и стекла были равны. Для оперативного НК толщины медного слоя и его разнотолщинности разработан вихретоковый прибор ПКР-1 с проходным преобразователем, применяемый на заводах-изготовителях платинита.

Для контроля герметичности корпусов приборов и аппаратов применяют методы течеискания. Они основаны на регистрации проникающих сквозь течи веществ и позволяют выявить сквозные дефекты, которые ввиду их малости невозможно обнаружить визуально или другими методами НК. Наиболее совершенны масс-спектрометрические течеискатели, чувствительные элементы которых реагируют на пробное вещество, в качестве которого обычно используется гелий, обладающий высокой проникающей способностью. Масс-спектрометрический гелиевый течеискатель ПТИ-10 позволяет регистрировать течи до $5 \cdot 10^{-13}$ м³ · Па/с в вакуумных корпусах, помещенных в атмосферу гелия, или утечки гелия из корпуса в атмосферу до $5 \cdot 10^{-11}$ м³ · Па/с. Галогенный течеискатель типа ГТИ-6 фиксирует утечки хладона-12 в атмосферу с порогом чувствительности $5 \cdot 10^{-7}$ м³ · Па/с и парциальное давление газа $6,65 \cdot 10^{-6}$ Па в вакуумированном объеме. Манометрические течеискатели обнаруживают разгерметизацию по изменению избыточного давления в корпусе. Они просты в устройстве, но предельный порог чувствительности не ниже $5 \cdot 10^{-6}$ м³ · Па/с. При большом объеме контроля применяют автоматизированные установки, в основном масс-спектрометрические и манометрические. Производительность контроля таких установок может достигать до 3000 изделий в час. Разгерметизация корпусов может быть обнаружена также по акустическим излучениям, возникающим при истечении воздуха или газа через отверстия. Акустические шумы истечения анализируют методами акустической эмиссии (АЭ) при создании избыточного внутреннего или наружного давления в герметичных объемах. Сигналы АЭ преобразуют в электрические обычно с помощью пьезоэлектрических преобразователей и обрабатывают специальной аппаратурой. Используя метод триангуляции, можно локализовать источник АЭ по сигналам нескольких преобразователей. Например, установка АФ-15 работает в диапазоне частот 20—2000 кГц, имеет 17 полосовых фильтров, два измерительных канала, а АФ-33 — в диапазоне частот 200—500 кГц и имеет 32 канала.

18.7. МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Развитие средств автоматики, переход к автоматизации все более сложных технологических процессов и новым методам управления производством, обеспечение надежной и экономичной эксплуатации крупного промышленного оборудования привело к выделению функциональной диагностики в самостоятельное научно-техническое направление, связанное с исследованием проблем автоматического определения работоспособности и прогнозирования технического состояния различного рода динамических объектов [18.17, 18.18].

В процессе эксплуатации на состояние объекта влияет множество различных факторов, которые по своей природе могут быть как неслучайными, например закономерное изменение площади контакта трущихся частей по мере их изнашивания, изменение условий смазки при увеличении зазоров и т.д., так и случайными — изменение нагрузочных и тепловых режимов, изменение физико-механических свойств смазочных материалов, влажность и запыленность внешней среды, квалификация обслуживающего персонала и множество других плохо поддающихся учету и нейтрализации факторов. Обычно, в лучшем случае, известны статистические характеристики этих факторов, однако и такая информация не всегда может быть привлечена при определении параметров системы, так как сам процесс измерения, в свою очередь, всегда носит вероятностный характер. Влияние случайных факторов на диагностируемый объект приводит к неоднозначности контроля его параметров. Внешним проявлением этого случайного характера является тот факт, что выходные параметры объекта и его состояние также представляют собой случайный процесс, а конкретный результат каждого измерения — его реализацию, поэтому при решении задач функциональной диагностики, и, в частности, оценки работоспособности динамических объектов, широкое распространение получили методы статистической теории распознавания образов и принятия решений при проверке гипотез [18.19].

Решение задачи автоматического диагностирования, как правило, проводят в два этапа. На первом этапе проводится накопление информации о состоянии диагностируемого объекта и преобразование ее к виду, удобному для последующей обработки. Второй этап заключается в выявлении особенностей, содержащихся в контролируемых параметрах, с целью поиска различий работоспособного состояния объекта от неработоспособного и формировании сигнала о наступлении соответствующего события. При этом важное значение имеют выбор, описание и анализ контролируемых параметров (признаков). Например, при испытаниях электронасосов необходимы одновременные измерения таких параметров, как частота вращения, напор, мощность, подача насоса, утечки через уплотнение, температура элементов [18.20]. По-

лезную информацию о технологических погрешностях электродвигателей дает исследование их виброакустических характеристик [18.21].

Считая, что распределение вероятностей каждого контролируемого параметра (признака) описывается нормальным законом, функционирование диагностируемого объекта можно представить многомерным нормальным случайным вектором, компонентами которого являются контролируемые параметры этого объекта $\{y_1, y_2, \dots, y_p\}$. Тогда задача автоматической функциональной диагностики сводится к определению принадлежности указанного случайного вектора Y_i к одному из m взаимоисключающих классов A_j , характеризующих различные технические состояния диагностируемого объекта. При этом о совокупности векторов, принадлежащих одному классу, принимается гипотеза компактности [18.22] о включении всех объектов каждого класса в одно подмножество, состоящее из конечного количества связанных областей.

Размерность p признакового пространства в значительной мере определяет вычислительную сложность диагностической процедуры, материальные и трудовые затраты на измерение необходимых характеристик. Уменьшение количества признаков снижает указанные затраты, но может привести к падению достоверности диагностирования, так как требования минимума общей размерности пространства признаков и максимума достоверности оказываются противоречивыми. Первоначальный набор диагностических признаков формируется из числа доступных измерению характеристик объекта, отражающих его наиболее существенные свойства. На следующем этапе из первоначального набора пытаются сформировать новый набор $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, состоящий из меньшего количества переменных $n < p$. Наиболее широкое распространение получили методы линейного преобразования исходного пространства признаков Y в новое пространство $X = AY$. Как правило, при этом используют декоррелирующее преобразование, для чего в качестве столбцов матрицы A , например, выбирают собственные векторы общей ковариационной матрицы M распознаваемых совокупностей. Тогда новая ковариационная матрица $M^* = A^T M A$ (где T означает операцию транспонирования) становится диагональной матрицей с собственными числами λ_i на главной диагонали. После указанного преобразования отбирают $n < p$ новых признаков, соответствующих собственным числам λ_i матрицы M^* , которые оказывают на значение некоторого критерия $J(Y)$ наибольшее влияние. Безусловно, различные используемые критерии могут приводить к противоположным по смыслу рекомендациям по выбору признаков, поэтому часто оказывается затруднительно отдать предпочтение какому-либо определенному критерию и сделать обоснованный выбор между противоречивыми рекомендациями.

Одним из широко распространенных методов, применяемых в теории распознавания образов, явля-

ется метод сравнения с эталоном. При этом под эталоном j -го класса понимается некоторый «средний» представитель этого класса, описание которого усреднено относительно всех векторов данного класса. Тогда сравнение классифицируемого состояния с эталоном эквивалентно оценке степени сходства между вектором эталона j -го класса и классифицируемым вектором. Так как при этом распознаются векторы одной и той же физической природы с качественно подобными признаками, все сведения о принадлежности конкретной реализации $\{x_i\}$ к одному из распознаваемых классов S_j могут быть получены на основе знаний условных вероятностей $P(x_i/S_j)$ совпадения предъявленной реализации с описанием соответствующего эталона каждого из классов.

Практическое использование указанного подхода затрудняется требованием априорного знания условных вероятностей $P(x_i/S_j)$, поэтому при отсутствии априорной информации о распределении классифицируемых признаков возникает необходимость ее восполнения, что связано с обработкой значительного количества реализаций для получения статистически достоверных результатов. Требуемый объем выборки оценивается с точки зрения ее представительности при заданной допустимой ошибке $\epsilon_{\text{доп}}$ и мере риска p ($\epsilon \leq \epsilon_{\text{доп}}$) [18.23]. Если, например, вероятность совпадения частоты конкретного значения признака, найденной по выборке, с частотой в генеральной совокупности должна быть равна 0,95 при погрешности $\epsilon_{\text{доп}} \leq 0,01$, то объем выборки составляет 9603 реализации. Объемы выборки для других значений $\epsilon_{\text{доп}}$ и p можно найти в [19.23].

Для выбора метода распознавания решающее значение имеет вид априорной неопределенности, для преодоления которой используется обучение системы распознавания. Если на основе априорной информации хотя бы приближенно можно установить вид закона распределения совокупности выборочных значений, то априорная неопределенность будет относиться лишь к параметрам этого распределения. Тогда целью обучения становится получение оценок этих параметров, и применяемые методы распознавания относят к *параметрическим* методам.

Наиболее общий случай характеризуется отсутствием информации даже о самом законе распределения наблюдаемой совокупности выборочных значений (непараметрическая неопределенность), поэтому применяемые в этом случае методы называют *непараметрическими*. В настоящее время при непараметрическом оценивании в основном используют гистограммный метод, метод Парзена, метод разложения по базисным функциям, метод полигонов Смирнова, метод локального оценивания по k — ближайшим соседям, а также ряд специальных методов нелинейного оценивания [18.24, 18.25]. Компактный обзор и подробное изучение современных методов непараметрического оценивания можно найти в [18.19].

Практическое применение непараметрических

алгоритмов адаптивного распознавания ограничивается из-за существенных вычислительных затрат и технических трудностей их реализации на ЭВМ. В связи с этим возрос интерес к разработке приближенных непараметрических алгоритмов обучения и распознавания, несколько уступающих по своему качеству общим параметрическим методам, но существенно более простых и удобных для практической реализации. В этих методах используются свойства вероятностных характеристик выбросов (количество пересечений определенного уровня, длительность выбросов, время достижения заданных границ, время пребывания в области значений и др.) случайных процессов и тот факт, что распределения указанных характеристик известным образом выражаются через многомерные плотности вероятности случайного процесса и его производных [18.26].

18.8. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Исходным материалом для оценки параметров распределений служит выборка из N реализаций $\{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$ случайной величины, наблюдаемой в ходе эксперимента. Точечная (или просто) оценка $\bar{\theta}_N$ параметра θ — любая статистика, т.е. функция выборочных значений x_i [$i = 0 \div (N-1)$], характеризующая аналогичные свойства выборки. Выбор «подходящих» статистик не обязательно однозначен, но всегда предпочитают *несмещенные* оценки θ , у которых математическое ожидание равно оцениваемому параметру; *состоятельные* оценки, сходящиеся по вероятности к θ при $n \rightarrow \infty$; *эффективные* оценки, для которых выборочное распределение обладает наименьшей дисперсией, а также оценки, которые вычисляются легче других.

Интервальной оценкой, или доверительным интервалом уровня γ , называют случайный интервал с заданной доверительной вероятностью γ , покрывающий истинное значение оцениваемого параметра.

В простейшем случае для неизвестного распределения оценивают значения начальных μ_k и центральных m_k моментов k -го порядка. Выборочные оценки этих величин соответственно равны:

$$\mu_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^k ;$$

$$m_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{\mu})^k,$$

где $\bar{\mu} = \bar{\mu}_1$ — выборочное среднее (выборочный первоначальный момент), представляющее собой состоятельную и несмещенную оценку математического ожидания μ случайной величины X . Дисперсия оценки $\bar{\mu}$ $D[\bar{\mu}] = \sigma^2/N$, где σ^2 — теоретическое значение дисперсии случайной величины X , зная которую нетрудно оценить требуемый объем выборки N , необходимый для получения гарантированной погрешности оценки

$\bar{\mu}$. Эффективность оценки $\bar{\mu}$ зависит от типа закона распределения. Для случая нормального закона распределения (НЗР) случайной величины X оценка $\bar{\mu}$ будет эффективной.

Заметим, что в общем случае оценка $\bar{\mu}_k$ соответствующего теоретического начального момента μ_k генеральной совокупности всегда является несмещенной и состоятельной, а $\bar{m}_k$ представляет собой состоятельную, но смещенную оценку для теоретического центрального момента m_k . Соответствующая несмещенная и состоятельная оценка для $m_2 = \sigma^2$ имеет вид

$$\bar{m}_2 = \bar{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{\mu})^2 = \frac{N}{N-1} \bar{m}_2.$$

$$\text{Дисперсия этой оценки } D[\bar{m}_2] = \frac{m_4}{N} - \frac{N-3}{N(N-1)} \sigma^2.$$

В этом выражении m_4 и σ^2 можно заменить их выборочными оценками, однако при ограниченной длине выборки N такая замена сопряжена с большими ошибками.

Для оценки формы кривой плотности распределения обычно используют коэффициенты асимметрии

$$\gamma_1 = m_3/\sigma^3 \text{ и эксцесса } \gamma_2 = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3, \text{ а для их}$$

выборочных оценок — соответствующие статистики, получаемые подстановкой в эти выражения оценок $\bar{m}_2$, $\bar{m}_3$ и $\bar{m}_4$. При этом значения $\gamma_1 > 0$ (положительная асимметрия) указывают на наличие заметного удлинения в правой части распределения. При $\gamma_1 < 0$ (отрицательная асимметрия) имеется удлинение в левой части кривой распределения. Для НЗР $\gamma_2 = 0$, при этом значение γ_2 служит характеристикой крутости (плосковершинности) распределения. При $\gamma_2 > 0$ кривая неизвестного распределения будет иметь более острую, а при $\gamma_2 < 0$ — более плоскую вершину по сравнению с НЗР.

Для оценки характеристики зависимости между двумя случайными величинами X и Y пользуются выборочными смешанными центральными моментами порядка Kl

$$\bar{\mu}_{kl} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})^k,$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ — выборочные средние соответствующих случайных величин.

Особый интерес представляет несмещенная состоятельная оценка выборочной ковариации X и Y

$$\bar{m}_{11} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

За меру зависимости между X и Y обычно принимается безразмерный коэффициент корреляции $\bar{k}_{xy} = \bar{m}_{11}/\bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y$; $\bar{\sigma}_x^2$, $\bar{\sigma}_y^2$ — соответствующие несмещенные оценки

дисперсий. Коэффициент корреляции $-1 \leq k_{xy} \leq 1$, для некоррелированных случайных величин $k_{xy} = 0$.

Регрессия Y на X — любая функция $g(x)$, приближенно представляющая собой статистическую зависимость Y от X . С помощью регрессии Y представляется в виде суммы двух случайных величин $Y = g(x) + h(x, y)$, где $h(x, y)$ — поправочный член (остаток). Коэффициент корреляции k_{xy} измеряет качество «наилучшего» линейного приближения регрессии $g(x)$ линейной функции

$$g(x) = \bar{y} + \bar{k}_{xy} \frac{\bar{\sigma}_y}{\bar{\sigma}_x} (x - \bar{x}). \text{ При этом наименьшее значение среднего квадрата отклонения (остаточная дисперсия) равно } \bar{\sigma}_y^2 = (1 - k_{xy}^2).$$

Соответствующие оценки параметров случайных процессов требуют осреднения по ансамблю N реализаций и в общем случае являются функциями времени t . Для стационарных в широком смысле процессов среднее значение постоянно во времени, а автоковариация зависит только от разности моментов наблюдения $\tau = t_2 - t_1$. Если взаимная ковариация двух случайных процессов также зависит только от разности τ , процессы $x(t)$ и $y(t)$ совместно стационарны в широком смысле. Совместно стационарные процессы стационарны и по отдельности. Стационарность в широком смысле определяется только в терминах первого и второго моментов, моменты более высоких порядков не рассматриваются.

Гипотеза эргодичности позволяет заменить усреднение по ансамблю реализаций усреднением по времени и требует принятия допущения о стационарности данных до момента четвертого порядка. При этом для оценок моментов используют записанные выше формулы, применяя в них осреднение по времени. Зависимость взаимной ковариации (автоковариации) от τ называют взаимно ковариационной (автоковариационной) функцией. Для указанных функций могут быть применены выражения для несмещенных и смещенных оценок. Однако на практике предпочтение часто отдают смещенной оценке, дисперсия которой, особенно при больших τ , всегда оказывается меньше дисперсии несмещенной оценки.

Смещенная оценка взаимно ковариационной функции $\bar{C}_{xy}(\tau)$, вычисленная по реализациям конечной длины N для двух в общем случае комплексных, случайных процессов с дискретным временем $x[n]$ и $y[n]$, имеет вид

$$\bar{C}_{xy}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-\tau-1} (x[n+\tau] - \bar{x})(y[n] - \bar{y})^*, & 0 \leq \tau \leq (N-1); \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-|\tau|-1} (x[n] - \bar{x})(y[n+|\tau|] - \bar{y})^*, & 0 > \tau \geq -(N-1), \end{cases}$$

где $*$ обозначает операцию комплексного сопряжения, $\bar{x}$, $\bar{y}$ — соответствующие средние.

При $x[n]=y[n]$ из этой формулы следует смещенная оценка функции автоковариации $\overline{C_{xx}}(\tau)$. Для центрированных процессов ($\bar{x}, \bar{y}=0$) получаем соответствующие смещенные оценки функций взаимной $\overline{r_{xy}}(\tau) = C_{xy}(\tau)$ и автокорреляции $\overline{r_{xx}}(\tau) = C_{xx}(\tau)$. В отличие от $\overline{C_{xy}}(\tau)$ и $\overline{r_{xy}}(\tau)$ оценку функций $\overline{C_{xx}}(\tau)$ и $\overline{r_{xx}}(\tau)$ обычно вычисляют только для $\tau > 0$, так как автоковариация и автокорреляция — сопряженно-симметричные функции τ .

Для случайного процесса с НЗР дисперсия оценки автокорреляции имеет вид [18. 27]

$$D[\overline{r_{xx}}(\tau)] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (r_{xx}^2[k] + r_{xx}[k+\tau]r_{xx}[k-\tau]),$$

где полагается, что $N \gg \tau$. При $N \rightarrow \infty$ дисперсия оценки стремится к нулю, откуда следует, что $\overline{r_{xx}}(\tau)$ — статистически состоятельная оценка. Оценка $\overline{r_{xx}}(\tau)$ связана с соответствующей несмещенной оценкой $\overline{r_{xx}}(\tau)$ соотношением

$$\overline{r_{xx}}(\tau) = \left(1 - \frac{|\tau|}{N}\right) \overline{r_{xx}}(\tau),$$

откуда заключаем, что при $N \rightarrow \infty$ $\overline{r_{xx}}(\tau)$ — асимптотически несмещенная оценка.

С увеличением индекса временного сдвига τ значение $D[\overline{r_{xx}}(\tau)]$ возрастает, соответственно растет и статистическая неопределенность оценки, так как усреднение проводится по все меньшему количеству отсчетов данных. По этой причине следует избегать вычислений для $\tau \geq N/2$, на практике обычно ограничиваются значениями $\tau \leq 0,1N$. Аналогичные рекомендации имеют место при вычислении и других оценок.

Другой, несколько видоизмененной, оценкой взаимно ковариационной функции служит

$$\overline{C'_{xy}}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n+\tau] - \bar{x})(y[n] - \bar{y})^*,$$

$$\overline{C'_{yx}}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \bar{x})(y[n+\tau] - \bar{y})^*,$$

$$|\tau| \leq (N-1).$$

Оценку $\overline{C'_{yx}}(\tau)$ применяют для отрицательных значений τ . Нетрудно видеть, что эта оценка совпадает с предыдущей смещенной оценкой, если соответствующие центрированные последовательности дополнить N нулями.

В соответствии с дискретным вариантом теоремы Винера—Хинчина взаимно ковариационная функция и функция взаимной спектральной плотности (ВСП) $S_{xy}(k)$ образуют пару дискретных преобразований Фурье (ДПФ)

$$S_{xy}(k) = T \sum_{\tau=0}^{N-1} \overline{C_{xy}}(\tau) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} k\tau\right),$$

$$k=0 \div (N-1);$$

$$\overline{C_{xy}}(\tau) = B \sum_{k=0}^{N-1} S_{xy}(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{T} k\tau\right),$$

$$\tau=0 \div (N-1),$$

где T — временной интервал дискретизации; $B = \frac{1}{NT}$ — шаг дискретизации по частоте.

Следовательно, оценку взаимно ковариационной функции можно определить по функции взаимной спектральной плотности и наоборот. Аналогичная связь имеет место для автоковариационной функции и спектральной плотности мощности (СПМ), а для центрированных процессов существует связь между функцией автокорреляции и СПМ последовательности $x[n]$. Наиболее простой вид соотношения Винера—Хинчина принимают для нормированных значений интервала дискретизации и шага по частоте ($T=1, B=1$).

Методы оценки взаимно и автоковариационной функций, а также взаимной и автокорреляции через соответственно ВСП и СПМ получили название косвенных методов. Если для оценки ВСП и СПМ используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), для больших N косвенные методы оказываются более экономичными по сравнению с непосредственной оценкой $\overline{C_{xy}}(\tau)$.

Заметим, что обратное преобразование Фурье от произведения $S_x S_y^*$, где S_x, S_y — соответственно СПМ последовательностей $x[n]$ и $y[n]$, вследствие предполагаемой цикличности ДПФ приводит к круговой взаимно корреляционной функции $C_{xy}^{(k)}(\tau)$, связанной с $\overline{C_{xy}}(\tau)$ соотношением

$$C_{xy}^{(k)}(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{N}\right) \overline{C_{xy}}(\tau) + \frac{\tau}{N} \overline{C_{xy}}(N-\tau).$$

Таким образом, $C_{xy}^{(k)}(\tau)$ представляет собой результат наложения отсчетов $\overline{C_{xy}}(\tau)$ для положительных и отрицательных значений τ . Дополнение нулями последовательностей $x[n]$ и $y[n]$, как отмечалось выше, приводит к смещенной оценке $\overline{C_{xy}}(\tau)$ и позволяет разделить части $\overline{C_{xy}}(\tau)$ и $\overline{C_{xy}}(N-\tau)$ в составе круговой взаимной корреляции. Для получения несмещенной оценки $\overline{C_{xy}}(\tau)$ первые N отсчетов обратного БПФ от произведения $(S_x S_y^*)$ необходимо умножить на $\frac{N}{N-\tau}$.

Почти во всех приложениях взаимно ковариационной функции определяется время относительной задержки двух последовательностей $x[n]$ и $y[n]$. Это связано с тем, что для одинаковых последовательностей, сдвинутых одна относительно другой на τ единиц, оценка $\overline{C_{xy}}(\tau)$ достигает максимума при значениях τ , равных сдвигу. Помимо задач определения задержки эта функция также находит применение при установлении эквивалентности временных последовательностей. При этом максимум взаимно ковариационной функции дает количественный показатель, отражающий степень сходства двух рядов данных. Для двух одинаковых временных функций, сдвинутых одна относительно

другой на время τ , максимальное значение коэффициента корреляции $\tilde{k}_{xy}(\tau)$ равно единице, для некоррелированных функций $\tilde{k}_{xy}(\tau) = 0$. Величина $\alpha = \sqrt{1 - k_{xy}^2(\tau)_{\max}}$ служит мерой «согласия» между $x[n]$ и $y[n]$ («стандартная ошибка оценки») [18.28].

Автоковариационные функции и их преобразование Фурье, т.е. спектры мощности, тесно связаны между собой и в принципе несут одну и ту же информацию. От СПМ, как правило, допускающей простую физическую интерпретацию, стремясь получить более наглядное графическое представление результатов, часто переходят к автокорреляции и наборот.

Квадрат модуля прямого преобразования Фурье последовательности

$$|X(k)|^2 = \left| T \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} nk\right) \right|^2, \\ k=0 \div (N-1)$$

часто называют выборочным спектром. Выборочный спектр не является состоятельной оценкой истинной СПМ. Хотя среднее значение выборочного спектра в пределе стремится к истинной СПМ, дисперсия при этом не стремится к нулю и по своему значению оказывается сравнима со средним значением выборочного спектра. Прямой метод оценки СПМ основан на вычислении при помощи БПФ $|X(k)|^2$ с использованием соответствующего статистического усреднения (метод периодограмм). Оценки СПМ, для получения которых используются корреляционные оценки, получили название коррелограммных методов. При использовании любого метода оценивания СПМ приходится принимать множество компромиссных решений, с тем чтобы по конечному набору отсчетов данных получать статистически устойчивые спектральные оценки с максимально возможным разрешением. Все эти компромиссы достаточно полно оцениваются количественно для НЗР случайной функции $x(t)$. Для произвольного закона распределения выбор конкретного метода спектрального оценивания часто обосновывают только экспериментальными данными, а не результатами теоретических исследований.

При вибрационном контроле состояния механизмов с трущимися поверхностями, подшипниками скольжения и качения, зубчатыми передачами и редукторами наиболее распространен метод сличения спектров. Спектры механических колебаний подшипников электродвигателей обнаруживают присутствие низкочастотных составляющих с частотами, связанными с частотой вращения валов, и вызванным их разбалансом, рассогласованием и т.п. На второй гармонике частоты вращения обнаруживаются составляющие механических колебаний, вызванные изгибом вала и несоосностью соответствующих деталей.

Большинство дефектов радиальных подшипников связано с гидродинамической неустойчивостью в системе вал—масляная пленка—корпус подшипника. Масляный вихрь представляет собой механи-

ческие колебания, при которых центр тяжести вала перемещается по кругу в пределах зазора в подшипнике при субсинхронной частоте вращения. Они обычно возникают на малонагруженных высокоскоростных валах на частотах около 40—49% частоты вращения, хотя иногда масляный вихрь наблюдается и в области более высоких частот.

Другим примером самогенерирующейся неустойчивости служит гистерезисный вихрь из-за механического гистерезиса вращающейся системы, возникающий при превышении ротором некоторой критической скорости, а затем поддерживающий соответствующую частоту колебаний независимо от частоты вращения вала.

Еще один тип неполадок, проявляющийся в области низких частот, обусловлен нарушением (разболтанностью) механических связей конструкций, что приводит к механическим колебаниям с частотами субгармоник и межгармоник.

Механические колебания в области средних частот связаны с гармониками частоты зубозацепления (определяемой произведением скорости вращения на число зубьев) в коробках передач и редукторах. По мере износа зубьев шестерен нарождающиеся дефекты приводят к изменению спектра, который выражается в повышении уровня боковых составляющих, разнесенных выше и ниже основной и второй гармоники частоты зубозацепления на гармоники частоты вращения. При этом результирующий сигнал становится все более похожим на сигнал с амплитудной модуляцией.

Колебания в области высоких частот связаны с зарождающимися дефектами подшипников с роликовыми элементами. Они обычно возникают в виде трещин или выбоин на самом роликовом элементе, на внутренней или наружной обойме. Возникновение трещины, например, сопровождается незначительными импульсами всякий раз по мере прокатывания по обойме роликового элемента. Такие импульсы сопровождаются вибрацией подшипника на соответствующих резонансных частотах, а сама система обладает свойствами механического усилителя. Если дефект расположен на неподвижной наружной обойме, каждый импульс будет иметь примерно одинаковую амплитуду; при дефекте вращающейся обоймы возможна амплитудная модуляция импульсов в зависимости от изменений нагрузки на роликовый элемент.

По результатам измерения среднеквадратичного значения виброскорости можно судить о состоянии машин с вращающимися элементами, сравнивая скорости механических колебаний с соответствующими предыдущими данными или установленными стандартами (например, международные стандарты ИСО 2372 и 3945 и др.). В стандартах аналогичные машины сгруппированы по мощности на валу и для них установлены допустимые среднеквадратичные значения виброскорости механических колебаний в диапазоне частот от 10 Гц до 1 кГц. Безусловно, на основе только широкополосных измерений невозможно обнаружить изменения состояния оборудования до того, как увеличивающаяся амплитуда некоторой составляющей не до-

стигнет уровня составляющей с самой большой амплитудой в рассматриваемой полосе частот. Путем же сличения спектров и их более детального анализа возможно не только более раннее предупреждение дефекта, но и определение его причин.

18.9. АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Обеспечение экономически эффективной, надежной и безопасной эксплуатации энергетических установок требует непрерывного совершенствования и широкого внедрения различных методов и средств НК и ТД. Вследствие крупных габаритов, широкой номенклатуры контролируемых узлов простое применение классических методов, да еще по отдельности, оказывается малоэффективным или экономически не оправданным. Кроме того, ряд новых задач, связанных с оценкой фактического состояния и остаточного ресурса как отдельных узлов, так и всего агрегата в целом, не поддается решению традиционными методами. К основным особенностям современных систем диагностирования относят значительное увеличение числа одновременно измеряемых параметров (многофункциональность контроля), проведение комплексного анализа с учетом многих влияющих факторов. Необходимость обработки больших массивов данных приводит ко все более широкому использованию современных высокопроизводительных средств вычислительной техники, встроенных микропроцессоров, персональных и мини-ЭВМ, что позволяет на основе общей информационной базы не только получать интегральные оценки качества функционирования объекта контроля, но и с высокой надежностью заблаговременно распознавать аномальные режимы, не допуская его аварийной эксплуатации.

Для решения диагностических задач прежде всего необходимо выбрать типы физических явлений и соответствующие им описанные выше методы НК, обеспечивающие наиболее полную информацию о диагностируемых параметрах контролируемого объекта. При этом весьма информативным считается исследование статистических характеристик случайных процессов, соответствующих технологическим шумам, сопровождающим его работу объекта (например, виброакустические, температурные, нейтронные шумы, пульсации давления теплоносителя и т.п.). Базнейшей проблемой здесь является не столько фиксация отклонений контролируемых параметров от нормативных значений (уставок), сколько детальное исследование возникающих физических эффектов на возможно более ранних стадиях зарождения дефектов или развития аварийной ситуации. Актуальной проблемой современного этапа научно-технического прогресса является создание для крупных энергетических объектов экспертных систем отображения (мониторизации) состояния оборудования на основе локальных сетей, объединяющих несколько мини-ЭВМ, каждая из которых обеспечивает обработку информации о состоянии отдельного агрегата или узла. Принятие решения о приостановке эксплуатации в связи с необходимостью проведения

соответствующих ремонтных работ возлагается в таких системах на квалифицированных специалистов-экспертов, руководствующихся объективной информацией, доставляемой диагностической системой.

Виброакустическая диагностика, включающая в себя методы и средства распознавания состояния контролируемых объектов на основе анализа их механических колебаний — одно из наиболее распространенных направлений ТД. Современные средства измерения вибраций энергетического оборудования турбоагрегатов, электронасосов, компрессоров и других вращающихся механизмов можно разбить на следующие группы: контрольно-сигнальную виброакустическую аппаратуру, прецизионные измерители вибраций и средства метрологического обеспечения, балансировочную аппаратуру, аппаратуру для проведения вибрационных испытаний, измерительно-вычислительную вибродиагностическую аппаратуру. По способу исполнения вибродиагностическая аппаратура подразделяется на стационарную аппаратуру непрерывного контроля, вибропреобразователи которой установлены стационарно в определенных точках контролируемого агрегата, а время работы равно времени непрерывной его эксплуатации; и аппаратуру инспекционного контроля и диагностики, периодически подключаемую к различным агрегатам и узлам.

Применение диагностической аппаратуры того или иного типа определяется назначением контролируемого объекта, его сложностью, экономической целесообразностью и, наконец, степенью опасности развития аварийной ситуации и последствиями его отказа. Например, агрегата и элементы оборудования первого контура АЭС, газоперекачивающих станций, мощные турбоагрегаты, судовые силовые энергетические установки и агрегаты летательных аппаратов, как правило, оснащаются стационарными системами; электроприводное оборудование и цеховое оснащение, вспомогательное оборудование АЭС, такое, как аварийные дизель-генераторы, дренажные и противопожарные насосы, вентиляторное оборудование и т.п. экономически целесообразнее контролировать переносными вибродиагностическими системами. Современная аппаратура обоих видов оснащается встроенными микропроцессорными средствами, обладает широкими функциональными возможностями и достаточно развитым математическим обеспечением, позволяющим прогнозировать остаточный ресурс контролируемых агрегатов. Предусмотрен режим перезаписи накопленной информации в более мощные мини-ЭВМ в целях создания и пополнения банка данных, а также их более тщательной обработки, анализа тенденций развития дефектов и т.д.

Современная вибродиагностическая аппаратура выпускается МНПО «Спектр» (табл. 18.14) и рядом зарубежных фирм (табл. 18.15). Для функциональной диагностики состояния подшипников качения (электродвигателей, электронасосов, вентиляторов и т.п.) применяют прибор ИСП-1, основанный на регистрации высокочастотных механических колебаний из-за соударений в повреж-

Таблица 18.14
Технические данные приборов ТД, выпускаемых МПО «Спектр»

Тип прибора	Число каналов	Индикация	Габариты, мм	Масса, кг	Примечание
Индикатор состояния подшипников качения ИСП-1	1	Световая, звуковая	210×92×55 (электронный блок); Ø40×140 (преобразователь)	2*	Динамический диапазон измерения 60 дБ
Контрольно-сигнальная аппаратура ВСВ-333	8 (уровень вибраций), 4 (относительное вибросмещение), 2 (осевой сдвиг)	Стрелочные приборы, световая, звуковая	515×274×523	28	Потребляемая мощность 100 В·А
Портативный виброанализатор ВВМ-337	2 (спектральный анализ вибраций), 1 (частота вращения)	Стрелочные приборы, цифровая	170×270×520 (измерительный блок)	12,6	Измерение интенсивности и спектрального состава вибраций на фиксированных частотах и гармониках частоты вращения, балансировка валопроводов турбин
Многоканальная автоматизированная аппаратура вибрационного контроля ВСВ-350	До 64	Стрелочные приборы, цифровая	170×270×520	11,4	Гармонический процессор вибраций и специпроцессор позволяют оценить состояние ОК за $t \leq 1$ с, (балансировка валопроводов турбоагрегатов)

* Без выносного источника питания, автономное питание от аккумуляторов 7Д-0,1.

Таблица 18.15
Технические данные приборов диагностирования зарубежных фирм

Тип прибора (изготовитель)	Число каналов	Диапазон частот измерения	Параметры встроенных фильтров		Габариты, мм	Масса, кг
			НЧ	ВЧ		
Портативный балансировочный комплект модели 3537 (Брюльн Кьер, Дания)	2 (вибрация), 1 (тахометрический датчик)	0,2 Гц—100 кГц (ускорение) 1 Гц—10 кГц (скорость) 1 Гц—1 кГц (смещение)	0,2—2 Гц (ускорение) 1—10 Гц (скорость, смещение) 10%, 12 дБ/окт	0,1; 1; 3; 10; 30; 100 кГц, 10%. 12 дБ/окт	184×332×314	10,5*
Виброанализатор модели 2515 (Брюльн Кьер, Дания)	1 (вибрация), 1 (частота вращения)	0,3 Гц—20 кГц (специпроцессор БПФ)	0,3; 1; 3 Гц	100; 200; 500 Гц 1; 2; 5; 10; 20 кГц	177×430×320	16,2*
Измеритель интенсивности вибраций «Виброметр 25» (Schenck, ФРГ)	1 (вибрация)	3 Гц—10 кГц (по стандартам ISO 2954, DIN 45666)	3; 10 Гц	300 Гц; 1 кГц	245×100×275	1,5*
Универсальный виброизмерительный прибор с микропроцессором «Вибропорт 30» (Schenck, ФРГ)	2 (ускорение), 2 (скорость), 2 (смещение), 1 (частота вращения)	1 Гц—10 кГц (по стандартам ISO 2954, DIN 45666)	2; 10 Гц	1; 5 кГц	316×130×320	9,8*
Переносной коллектор (анализатор данных) «Мовилор» (Metravib Instruments, Франция)	1 (аналоговые данные), 1 (частота вращения)	100 Гц—20 кГц (специпроцессор БПФ)	2—300 Гц (стандарт VDI 2063) 10—1000 Гц (стандарты NFE 90, 100, VDI 2056)		215×324×68	2,8*

* Прибор с автономным питанием.

денной зоне (выкрашивание, раковины, трещины, посторонние частицы в смазке и т.п.). Для контроля вибраций корпусов и относительных виброперемещений вала в подшипниках скольжения турбоагрегатов, осевых сдвигов валопроводов, а также для аварийной сигнализации о превышении установленных значений параметров вибраций используют аппаратуру ВСВ-333. Портативный виброанализатор ВВМ-337 и многоканальная аппаратура с микропроцессором ВСВ-350 предназначены для анализа спектра вибраций и защиты турбоагрегатов, определения их скоростных и нагрузочных характеристик, а также одно- и многоплоскостной балансировки валопроводов.

Малогобаритные переносные приборы, такие как «Мовиол», «Вибропорт 30», виброанализатор 2515, применяются для решения самых разнообразных задач по сбору и предварительной спектральной обработке информации о состоянии энергетического оборудования в процессе производства, контроля качества, испытаний и технического обслуживания на тепловых и атомных станциях, нефтехимических и газоперерабатывающих предприятиях (главные циркуляционные насосы, насосы питающей воды парогенераторов, дренажные насосы в системе низкого давления, главная турбинная установка, охлаждающие насосы трансформаторов, мотор-генераторные установки узлов привода управляющих штанг реакторов АЭС и т.п.) [18.29]. Гармонический анализ вибраций с усреднением по ансамблю реализаций в таких приборах, как правило, выполняется при помощи специпроцессоров БПФ, предусмотрена автоматизация процесса сличения контролируемых и эталонных спектров. Встроенный микропроцессор позволяет проводить балансировку роторов любого размера и массы на месте их эксплуатации, автоматически рассчитывая необходимые для устранения дисбаланса корректирующие массы и места их установки. Для повторной балансировки в памяти микропроцессора возможно хранение данных предыдущей балансировки по нескольким десяткам роторов. Для эффективной обработки накопленной информации разработано специальное математическое обеспечение — пакет прикладных программ модели 7616 для контроля состояния промышленного оборудования (Брюль и Кьер, Дания) пакет «Мовископ» (Metravib Instruments, Франция). Ведутся интенсивные разработки отечественной аппаратуры подобного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 18.1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
- 18.2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986.
- 18.3. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. / Под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 3. Электромагнитный контроль. М.: Высшая школа, 1991.
- 18.4. Некрасов М.М., Платонов В.В., Дадеко Л.И. Неразрушающие методы обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры. Киев: Техника, 1980.
- 18.5. Приборы и методы температурных измерений: Учебн. пособие для учащихся средн. спец. учебн. заведений / Б.Н. Олейник, С.И. Лаздин, В.П. Лаздин и др. М.: Изд-во стандартов, 1987.
- 18.6. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1982.
- 18.7. Гаврилин В.В., Гругулис Ю.К., Пориных В.М. Электромагнитные радиоволновые приборы для контроля слоев полупроводниковых и металлических структур. Рига: Зинатне, 1982.
- 18.8. ОСТ 11021.006-76. Проволока из тугоплавких металлов и сплавов для изделий электронной техники. Методы контроля.
- 18.9. Тепловая дефектоскопия статоров мощных турбогенераторов / И.А. Глебов, М.М. Мирошников, В.В. Романов и др. // Дефектоскопия. 1981. №11. С. 69—75.
- 18.10. Корзухин Г.С., Чистяков В.К., Пятыхин А.И. Контроль кристаллографической структуры в движущейся полосе анизотропной электротехнической стали // Дефектоскопия. 1981. №2. С. 28—37.
- 18.11. Журавский А.Г., Казаджан Л.Б., Слаута С.П. Прибор для контроля механических напряжений в трансформаторной стали // Дефектоскопия. 1983. №5. С. 34—38.
- 18.12. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 18.13. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х томах / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978.
- 18.14. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1980.
- 18.15. Шейкин А.А., Богданов Г.П., Лебедев Л.К. Контроль пористости опорных стержневых изоляторов с помощью ультразвука // Дефектоскопия. 1980. №9. С. 69—75.
- 18.16. Клюев В.В., Вайнберг Э.И. Рентгеновская вычислительная томография в промышленной диагностике // Приборы и системы управления. 1989. №5. С. 10—12.
- 18.17. Рабинович В.И., Розов Н.А., Тимошен Л.С. Предмет и задачи технической диагностики // Автотестирование. 1965. №1. С. 27—34.
- 18.18. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики динамических систем. Рига: Зинатне, 1967.
- 18.19. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986.
- 18.20. Насосы АЭС: Справочное пособие / П.Н. Пак, А.Я. Белоусов, А.И. Тисшин и др.; Под общ. ред. П.Н. Пака. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 18.21. Вибрации и шум электрических машин малой мощности / Л.Е. Волков, Р.Н. Ковалев, Г.Н. Никифорова и др. Л.: Энергия, 1979.
- 18.22. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розо-

коэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин. М.: Наука, 1970.

18.23. Метропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Физматгиз, 1961.

18.24. Патрик Э. Основы теории распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. Б.Р. Левина. М.: Сов. радио, 1980.

18.25. Ченцов Н.Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М.: Наука, 1972.

18.26. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов. М.: Связь, 1980.

18.27. Дженкинс Дж., Ваттс Г. Спектральный анализ и его приложения. 1971. Вып. 1; 1972. Вып. 2.

18.28. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982.

18.29. Браун Д.Н. Мониторизация состояния машинного оборудования путем анализа механических колебаний. Опыт применения мониторинга на атомной электростанции. Брюль и Кьер. Технические данные. Примеры применения. Перевод технического обзора, 1987. №1.

Раздел 19

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

СОДЕРЖАНИЕ

19.1. Общие сведения	417	изоляция (425). Применение малых напряжений (426). Электрическое разделение сети (426). Электрозащитные средства (426)	
Воздействие электрического тока на организм человека (417). Виды электротравм (418). Факторы, влияющие на исход поражения током (418). Классификация электроустановок (418). Классификация помещений по опасности поражения током (420). Первая доврачебная помощь пораженному электрическим током (420)		19.3. Электрооборудование пожароопасных зон	427
19.2. Безопасность электроустановок	421	Классификация пожарных зон (427). Выбор электрооборудования для пожароопасных зон (427). Электропроводники, кабельные линии и шинопроводы (429).	
Защитные меры в электроустановках (421). Защитное заземление (422). Зануление (423). Требования к заземляющим и нулевым защитным проводникам (424). Соединения заземляющих и нулевых защитных проводников (425). Защитное отключение (425). Контроль		19.4. Влияние электроустановок на окружающую среду	429
		Электрическое поле электроустановок сверх- и ультравысоких напряжений промышленной частоты (429). Переменное магнитное поле частотой 50 Гц (433). Постоянное магнитное поле (434).	
		Список литературы	434

19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Воздействие электрического тока на живую ткань в отличие от воздействия других материальных факторов (пар, химические вещества, излучение и т. п.) имеет своеобразный и разносторонний характер. Ток, проходя через организм человека, производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействия.

Термическое воздействие проявляется в ожогах отдельных участков кожи, нагреве до высокой температуры кровеносных сосудов, нервов, сердца и других органов, находящихся на пути тока, что вызывает в них серьезные функциональные расстройства.

Электролитическое воздействие выражается в

разложении органических жидкостей, в том числе крови, что сопровождается значительными нарушениями их физико-химических составов.

Механическое (динамическое) воздействие выражается в расслоении, разрыве и других подобных повреждениях тканей организма, в том числе мышечной ткани, кровеносных сосудов и прочего, а также мгновенном взрывоподобном образовании пара в перегретых током тканевой жидкости и крови.

Биологическое воздействие проявляется в раздражении живых тканей организма, что вызывает их возбуждение, т.е. специфическую деятельность, а также в нарушении внутренних биоэлектрических процессов, протекающих в нормально действующем организме и теснейшим образом связанных с его жизненными функциями. Биологическое воздействие тока возможно лишь на живую материя.

ВИДЫ ЭЛЕКТРОТРАВМ

Электротравма — травма, вызванная воздействием электрического тока или электрической дуги.

Указанное многообразие воздействия тока на организм нередко приводит к различным электротравмам, которые условно сводятся к двум видам: местным электротравмам, при которых возникает местное повреждение организма, и общим электротравмам, так называемым электрическим ударам, при которых поражается (или создается угроза поражения) весь организм из-за нарушения нормальной деятельности жизненно важных органов и систем.

В промышленности электротравмы по видам распределяются примерно следующим образом [19.2]: 20 % местные электротравмы, 25 % электрические удары, 55 % смешанные травмы, т.е. одновременно местные электротравмы и электрические удары.

Местные электротравмы — электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, механические повреждения и электроофтальмия.

Электрический ожог — самая распространенная электротравма: ожоги возникают у большей части (63 %) пострадавших от электрического тока, причем треть их (23 %) сопровождается другими местными травмами. Около 85 % всех электрических ожогов приходится на электромонтеров, обслуживающих действующие электроустановки.

Электрический удар — это возбуждение живых тканей организма проходящим через него электрическим током, проявляющееся в непроизвольных судорожных сокращениях различных мышц тела.

Степень воздействия на организм электрических ударов различна. Самый слабый электрический удар вызывает лишь едва ощутимое сокращение мышц в месте входа или выхода тока; в худшем случае он приводит к нарушению и даже полному прекращению деятельности легких и сердца, т.е. к гибели организма. При этом внешних местных повреждений человек может и не иметь.

В зависимости от исхода воздействия тока на организм человека электрические удары условно делятся на следующие пять степеней [19.2]:

I — судорожное едва ощутимое сокращение мышц;

II — судорожное сокращение мышц, сопровождающееся сильными, едва переносимыми болями, без потери сознания;

III — судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимися дыханием и работой сердца;

IV — потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания либо того и другого вместе;

V — клиническая смерть, т.е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Электрические удары являются грозной опасностью для жизни пострадавшего: они вызывают 85—87 % смертельных поражений (считая за 100 % все случаи смертельных исходов от воздействия тока).

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИСХОД ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ

Исход воздействия тока на человека зависит от ряда факторов, в том числе от значения тока, длительности протекания его через тело человека, рода и частоты тока, индивидуальных свойств человека, а также от характера электроустановки, окружающей среды и класса помещения по опасности поражения током. Степень воздействия увеличивается с ростом тока. Характер этого воздействия показан в табл. 19.1. Электрическое сопротивление тела человека и приложенное к нему напряжение, т.е. напряжение прикосновения, также влияют на исход поражения, так как они определяют значение тока, протекающего через тело человека. Однако в практике нормирования условий электробезопасности удобнее пользоваться именно термином напряжение прикосновения (табл. 19.2, 19.3).

Напряжение прикосновения — напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Напряжение шага в настоящее время не нормируется.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

По условиям электробезопасности электроустановки разделяются на электроустановки до 1 кВ и электроустановки выше 1 кВ (по действующему значению номинального напряжения).

В отношении мер электробезопасности электроустановки разделяются на четыре группы в зависимости от номинального напряжения и режима нейтрали.

электроустановки выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю);

электроустановки выше 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю);

электроустановки до 1 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью;

электроустановки до 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью.

Электрической сетью с эффективно заземленной нейтралью называется трехфазная электрическая сеть выше 1 кВ, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4.

Коэффициентом замыкания на землю в трехфазной электрической сети называется отношение разности потенциалов между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока).

Изолированной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие

Т а б л и ц а 19.1

Характер воздействия электрического тока на организм человека

Значение тока, мА	Род тока	
	Переменный ток промышленной частоты	Постоянный ток
0,6—1,5	Начало ощущения — слабый зуд, пощипывание кожи под электродами	Не ощущается
2,0—4,0	Ощущение тока распространяется на запястье руки, слегка сводит руку	Не ощущается
5,0—7,0	Болевые ощущения усиливаются во всей кисти руки, сопровождаясь судорогами; слабые боли ощущаются во всей руке, вплоть до предплечья. Как правило, человек в состоянии преодолеть судорожное сокращение мышц и разжать руку, в которой зажат электрод, т.е. оторвать руку от электрода	Начало ощущения. Впечатление нагрева кожи под электродом
8,0—10	Сильные боли и судороги во всей руке, включая предплечье. Руки трудно, но в большинстве случаев еще можно оторвать от электрода	Усиление ощущения нагрева кожи
10—15	Едва переносимые боли во всей руке. Во многих случаях руки невозможно оторвать от электродов. С увеличением продолжительности протекания тока боли усиливаются	Еще большее усиление ощущения нагрева как под электродами, так и в прилегающих областях кожи
20—25	Руки парализуются мгновенно, оторваться от электродов невозможно. Сильные боли, дыхание затруднено	Еще большее усиление нагрева кожи, возникновение ощущения внутреннего нагрева. Незначительные сокращения мышц рук
25—50	Очень сильная боль в руках и груди. Дыхание крайне затруднено. При длительном протекании тока может наступить паралич дыхания или ослабление деятельности сердца с потерей сознания	Ощущение сильного нагрева, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникают едва переносимые боли в результате судорожного сокращения мышц
50—80	Дыхание парализуется через несколько секунд; нарушается работа сердца. При длительном протекании тока может наступить фибрилляция сердца	Ощущение очень сильного поверхностного и внутреннего нагрева, сильные боли во всей руке и в области груди. Затруднение дыхания. Руки невозможно оторвать от электродов из-за сильных болей в момент нарушения контакта
100	Фибрилляция сердца через 2—3 с; еще через несколько секунд — паралич дыхания	Паралич дыхания при длительном протекании тока
300	То же действие за меньшее время	Фибрилляция сердца через 2—3 с; еще через несколько секунд — паралич дыхания
Более 5000	Дыхание парализуется немедленно — через доли секунды. Возможна временная остановка сердца в период протекания тока. При длительном протекании тока (несколько секунд) тяжелые ожоги, разрушение тканей. Как правило, исход смертельный	Фибрилляция сердца обычно не наступает. Фибрилляция сердца обычно не наступает. При длительном протекании тока (несколько секунд) тяжелые ожоги, разрушение тканей. Как правило, исход смертельный

П р и м е ч а н и е. Приведенные данные соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука—рука или рука—ноги

Т а б л и ц а 19.2

Наибольшее допустимое напряжение прикосновения U и ток I , проходящий через человека, при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью [19.3]

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t , с											
		0,01—0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Свыше 1,0
Переменный 50 Гц	U , В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	I , мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Переменный 400 Гц	U , В	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36
	I , мА	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8
Постоянный	U , В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I , мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
Выпрямленный двухполупериодный	U_m , В	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
	I_m , мА	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	—
Выпрямленный однополупериодный	U_m , В	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—
	I_m , мА	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	—

П р и м е ч а н и я : 1. В таблице приведены предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, проходящих через человека при взаимодействии с электроустановками производственного назначения в аварийном режиме.

2. Аварийный режим электроустановки — работа неисправной электроустановки, при которой могут возникнуть опасные ситуации, приводящие к электротравмированию людей, взаимодействующих с электроустановкой.

3. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и тока установлены для путей тока в теле человека от одной руки к другой и от руки к ногам.

4. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и тока, протекающего через человека в течение более 1 с, соответствуют отпускающим (переменным) и болевым (постоянным) токам.

5. Для переменных токов в таблице указаны действительные (эффективные) значения нормируемых величин, а для выпрямленных — амплитудные.

Т а б л и ц а 19.3

Наибольшие допустимые напряжения прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок переменного тока промышленной частоты напряжением выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью [19.3]

Продолжительность воздействия тока, с	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Более 5
Наибольшее допустимое значение напряжения, В	500	400	200	130	100	65

реакторы и подобные им устройства, имеющие большое сопротивление.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПО ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ТОКОМ

Все помещения по степени опасности поражения человека электрическим током делятся на три класса: без повышенной опасности, с повышенной опасностью и особо опасные. Характеристика этих классов помещений дана в табл. 19.4. Основой классификации является учет наличия или отсутствия в помещении условий, усиливающих опасность воздействия тока на человека, в том числе состояние окружающей среды, проводимость полов, размещение оборудования и др. Большая часть этих условий воздействует и на электрическую изоляцию электроустановок и диктует тем самым выбор соответствующих типов электрооборудования, способов прокладки проводов, а также особенности обслуживания электроустановок.

ПЕРВАЯ ДОВРАЧЕБНАЯ ПОМОЩЬ ПОРАЖЕННОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Первая доврачебная помощь при несчастных случаях от электрического тока состоит из двух этапов: освобождение пострадавшего от воздействия тока и оказание ему медицинской помощи.

Освобождение пострадавшего от воздействия тока может быть осуществлено несколькими способами. Наиболее простой и верный способ — это отключение соответствующей части электроустановки. Если отключение быстро произвести почему-либо нельзя (например, далеко расположен выключатель), можно при напряжении до 1000 В перерубить провода топором с деревянной рукояткой или оттянуть пострадавшего от токоведущей части, взявшись за его одежду, если она сухая, отбросить от него провод с помощью деревянной палки и т.п. При напряжении выше 1000 В следует надеть диэлектрические перчатки и боты и действовать штангой или изолирующими клещами, рассчитанными на соответствующее напряжение.

Меры первой медицинской помощи пострадавшему от электрического тока зависят от его состояния. Если пострадавший в сознании, но до этого был в обмороке или продолжительное время находился под током, ему необходимо обеспечить полный покой до прибытия врача или срочно доставить в медицинское учреждение.

При отсутствии сознания, но сохранившемся дыхании необходимо уложить пострадавшего на мягкую подстилку, расстегнуть пояс и одежду, обеспечить приток свежего воздуха, давать нюхать нашатырный спирт, опрыскивать лицо холодной водой.

При отсутствии признаков жизни необходимо

Т а б л и ц а 19.4

Классификация помещений по степени опасности поражения людей электрическим током

Класс помещения	Характеристика помещения
Без повышенной опасности	Помещения, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную опасность или особую опасность (см. ниже)
С повышенной опасностью	Помещения, характеризующиеся наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: а) сырости (сырые помещения), в которых относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %; б) токопроводящей пыли (помещения с токопроводящей пылью), в которых по условиям производства выделяется технологическая токопроводящая пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т.п.; в) токопроводящих полов (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных и т.п.); г) высокой температуры воздуха (жаркие помещения), в которых под воздействием различных тепловых излучений температура воздуха превышает постоянно или периодически (более 1 сут) 35 °С (например, помещения с сушилками, сушильными и обжигowymi печами, котельными и т.п.); д) возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны
Особо опасные	Помещения характеризующиеся наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность: а) особой сырости (особо сырые помещения), в которых относительная влажность воздуха близка к 100 % (потолок, стены, пол и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой); б) химически активной или органической среды (помещения с химически активной или органической средой), в которых постоянно или в течение длительного времени содержатся агрессивные пары, газы, жидкости, образуются отложения или плесень, разрушающие изоляцию и токоведущие части электрооборудования; в) одновременно двух или более условий повышенной опасности

П р и м е ч а н и е. Территории, на которых размещены наружные электроустановки, приравниваются к особо опасным помещениям. Наружными или открытыми электроустановками называются электроустановки, не защищенные зданием от атмосферных воздействий. Электроустановки, защищенные только навесами, сетчатыми и тому подобными ограждениями, рассматриваются как наружные.

делать искусственное дыхание и массаж сердца. Искусственное дыхание должно быть начато немедленно после освобождения пострадавшего от воздействия тока и выявления его состояния. Оно должно производиться методами, известными под названиями «изо рта в рот» и «изо рта в нос». Эти методы заключаются в том, что оказывающий помощь вдвухает воздух из своих легких в легкие пострадавшего через его рот или через нос. Установлено, что воздух, выдыхаемый из легких, содержит достаточное для дыхания количество кислорода. При этом способе пострадавшего укладывают на спину, удаляют изо рта посторонние предметы и слюзу. Для раскрытия рта и освобождения входа в гортань, закрытого запавшим языком, оказывающий помощь запрокидывает голову пострадавшего назад, положив под шею одну руку, а второй рукой надавливает на лоб пострадавшего, максимально запрокидывая его голову.

После этого оказывающий помощь делает глубокий вдох и с силой выдыхает воздух в рот пострадавшего. При этом он должен охватить губами весь рот пострадавшего и своей щекой или пальцами руки зажать ему нос (рис. 19.1, а). Затем оказывающий помощь откидывается назад и делает новый вдох. В этот период грудная клетка пострадавшего опускается и он делает пассивный выдох (рис. 19.1, б). В одну минуту следует делать 12 вдуваний. Вдувание воздуха можно производить через марлю, носовой платок или специальную трубку. При появлении первых слабых вдохов у пострадавшего следует продолжать искусственное дыхание до восстановления у него глубокого и ритмичного самостоятельного дыхания, приучивая вдувание к началу собственного вдоха пострадавшего.

Наружный массаж сердца необходим для искусственного поддержания в организме кровообращения и восстановления самостоятельной деятельности сердца. Определить прощупыванием место надавливания, которое должно находиться примерно на два пальца выше мягкого конца грудины (рис. 19.2, а), оказывающий помощь кладет на него нижнюю часть ладони одной руки, а затем поверх первой руки кладет ладонь второй руки (рис. 19.2, б) и надавливает на грудную клетку пострадавшего, слегка помогая при этом наклоном своего корпуса. Надав-

ливать следует примерно один раз в секунду быстрым толчком так, чтобы сместить нижнюю часть грудины вниз в сторону позвоночника на 4—5 см. После быстрого толчка, который должен длиться не более 0,5 с, оказывающий помощь слегка выпрямляется не отнимая рук от груди и производит следующее нажатие. За минуту необходимо делать не менее 60 надавливаний.

Одновременно с массажем сердца нужно выполнять искусственное дыхание (вдувание). Вдувание надо производить в промежутках между надавливаниями или же во время специальной паузы через каждые 4—5 надавливаний. Если помощь оказывает один человек, он обязан чередовать операции: после двух вдуваний воздуха производить 15 надавливаний на грудную клетку.

О восстановлении деятельности сердца у пострадавшего судят по появлению у него собственного, не поддерживаемого массажем регулярного пульса. Для проверки пульса необходимо прерывать массаж на 2—3 с.

19.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Электробезопасность действующих электроустановок должна обеспечиваться [19.4] выполнением организационных и технических мероприятий, а также применением технических способов и средств защиты. Организационные мероприятия включают: допуск к работе в действующих электроустановках лиц, прошедших инструктаж и обучение безопасным методам труда; проверку знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно к выполняемой работе с присвоением соответствующей квалификационной группы по электробезопасности; назначение лиц, ответственных за организацию и безопасность производства работ; оформление наряда или распоряжения на производство работ, составление перечня работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации; осуществление допуска к проведению работ; организацию надзора за проведением работ; оформление перерывов в работе, переводов на другие рабочие места, окончания

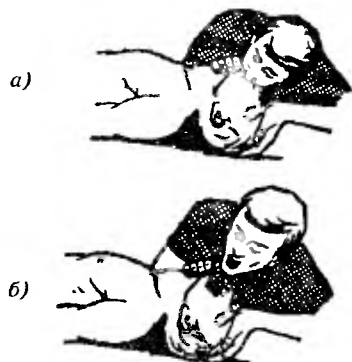


Рис. 19.1. Искусственное дыхание способом «изо рта в рот»; а — вдох; б — выдох

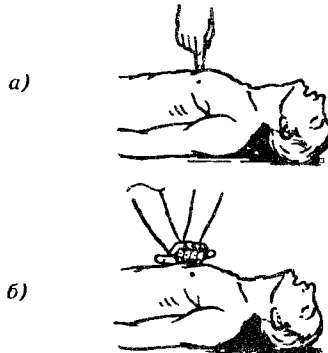


Рис. 19.2. Наружный (непрямой) массаж сердца: а — место надавливания на грудную клетку; б — положение рук оказывающего помощь перед надавливанием на грудную клетку

работы; установление рациональных режимов труда.

Технические мероприятия при проведении работ в действующих электроустановках со снятием напряжения включают: отключение электроустановки (части установки) от источника питания электроэнергией; механическое запирание приводов отключенных коммутационных аппаратов; снятие предохранителей; отсоединение блокировок и концов питающих линий и другие действия, исключающие ошибочную подачу напряжения к месту работы; проверку отсутствия напряжения; заземление отключенных токоведущих частей (включением заземляющих ножей, наложением переносных заземляющих устройств); ограждение остающихся под напряжением токоведущих частей, к которым в процессе работы можно прикоснуться или приблизиться на недопустимое расстояние; установку знаков и плакатов безопасности; ограждение рабочего места (или токоведущих частей) и установку знаков безопасности; безопасное расположение работающих и используемых механизмов, приборов и приспособлений.

Организационные и технические мероприятия при выполнении работы на находящихся под напряжением токоведущих частях или вблизи них включают: выполнение работ по наряду не менее чем двумя лицами; непрерывный надзор за выполняющими работу; применение электроззащитных ограждений и средств; изолирование рабочего места; безопасное расположение работающих и используемых механизмов и приспособлений.

Обеспечение электробезопасности техническими способами и средствами должно достигаться применением: защитного заземления, зануления, защитного отключения, выравнивания потенциала, защитного шунтирования, малого напряжения, разделения сети, изоляции токоведущих частей (рабочей, дополнительной, двойной), компенсации токов замыкания на землю, изолирования рабочего места, электроззащитных средств (основных и дополнительных).

Технические способы и средства защиты применяются раздельно или в их сочетании так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Технические способы и средства защиты, обеспечивающие электробезопасность, должны устанавливаться с учетом: номинального напряжения; рода и частоты тока электроустановки; способа электроснабжения (от стационарной сети, от автономного источника питания электроэнергией); режима нейтрали (средней точки) источника питания электроэнергией; вида исполнения (стационарные, передвижные, переносные); условий внешней среды; возможности снятия напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых должна проводиться работа; характера возможного прикосновения человека к элементам цепи тока; возможности приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на расстояние меньше допустимого или попадания в зону растекания тока; видов работ (монтаж, наладка, испытание и т.п.).

ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Защитным заземлением называется преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением [19.1, 19.5].

Защитное заземление должно обеспечивать защиту людей от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции или по другим причинам.

Следует отличать защитное заземление от заземления молниезащиты, рабочего заземления, повторного заземления нулевого защитного проводника.

Принцип действия защитного заземления заключается в снижении до безопасных значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус, что достигается за счет уменьшения потенциала заземленного оборудования (при уменьшении сопротивления заземляющего устройства), а также за счет выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования.

Область применения защитного заземления: а) в сетях напряжением до 1 кВ: переменного тока трехфазных трехпроводных с изолированной нейтралью; переменного тока однофазных двухпроводных изолированных от земли; постоянного тока двухпроводных с изолированной средней точкой обмоток источника тока; б) в сетях напряжением выше 1 кВ: переменного и постоянного тока с любым режимом нейтральной или средней точек обмоток источника тока.

Заземлителем называется проводник или совокупность металлических соединенных проводников, находящихся в соприкосновении с землей или ее эквивалентом. Различают искусственные и естественные заземлители.

Искусственные заземлители (горизонтальные и вертикальные) предназначены исключительно для целей заземления. Для изготовления искусственных заземлителей рекомендуется применять сталь. При этом они не должны иметь окраски.

Наименьшие размеры стальных искусственных заземлителей приведены ниже:

Диаметр круглых прутковых заземлителей, мм:	
неоцинкованных	10
оцинкованных	6
Сечение прямоугольных заземлителей, мм ²	48
Толщина прямоугольных заземлителей, мм	4
Толщина полок уголкового стали, мм	4

Площадь сечения горизонтальных заземлителей для электроустановок напряжением выше 1 кВ выбирается по термической стойкости (исходя из допустимой температуры нагрева 400 °C) [19.1].

При опасности коррозии заземлителей должно выполняться одно из следующих мероприятий: увеличение числа заземлителей с учетом расчетного срока их службы, применение оцинкованных заземлителей, применение электрической защиты.

В качестве искусственных заземлителей допу-

сается применение заземлителей из электропроводящего бетона.

Естественные заземлители — находящиеся в соприкосновении с землей электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для заземления.

Рекомендуется [19.1] в качестве заземлителей электроустановок в первую очередь использовать естественные заземлители.

В качестве естественных заземлителей используют: проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы (за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывчатых газов и смесей); металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, находящиеся в соприкосновении с землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле (алюминиевые оболочки кабелей не допускается использовать в качестве естественных заземлителей); если оболочки кабелей являются единственными заземлителями, то в расчете заземляющих устройств они должны учитываться при количестве кабелей не менее двух; рельсовые пути магистральных неэлектрофицированных дорог и подземные пути при наличии преднамеренного устройства перемычек между рельсами и др.

Металлические и железобетонные конструкции при использовании их в качестве заземляющих устройств должны образовывать непрерывную электрическую цепь по металлу. В железобетонных конструкциях должны предусматриваться закладные детали для присоединения электрического и технологического оборудования.

Заземляющее устройство (ЗУ) — совокупность конструктивно объединенных заземлителя и заземляющих проводников.

Различают контурные и выносные заземляющие устройства.

При выполнении контурного заземляющего устройства заземляемое оборудование находится в непосредственной близости от заземляющего устройства; при выполнении выносного — заземляемое оборудование расположено вне площадки, на которой расположен заземлитель (вне зоны растекания тока заземляющего устройства).

Заземляющие устройства должны обладать следующими сопротивлениями растеканию тока R_z :

в электроустановках напряжением до 1 кВ:

не более 10 Ом при суммарной мощности генераторов или трансформаторов, питающих данную сеть, не более 100 кВ·А; не более 4 Ом во всех остальных случаях;

в электроустановках напряжением выше 1 кВ:

не более 0,5 Ом для электроустановок напряжением от 110 до 750 кВ в сети с эффективно заземленной нейтралью;

$R_z = 250/I_3$ Ом для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сети с изолированной нейтралью при использовании заземления для электроустановок только выше 1 кВ;

$R_z = 125/I_3$ Ом для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сети с изолированной нейтралью

при использовании заземляющего устройства одновременно для электроустановок до и выше 1 кВ.

Здесь I_3 — расчетный ток замыкания на землю, он должен определяться для той из возможных в эксплуатации схемы сети, в которой сила тока замыкания на землю имеет наибольшее значение.

При удельном сопротивлении земли $\rho > 500$ Ом·м допускается вводить на указанные значения сопротивлений заземляющего устройства повышающие коэффициенты, зависящие от ρ .

Допускается проводить расчеты заземляющих устройств по нормам на напряжение прикосновения.

ЗАНУЛЕНИЕ

Зануление — преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей с заземленной нейтральной точкой источника электроэнергии с целью автоматического отключения участка при замыкании на корпус [19.1, 19.5].

Нулевой защитный проводник — проводник, соединяющий зануляемые части с заземленной нейтральной точкой обмотки источника электроэнергии или ее эквивалентом.

Нулевой рабочий проводник — проводник, используемый для питания электроустановки, соединенный с заземленной нейтралью источника электроэнергии;

Принцип действия зануления. При замыкании на корпус зануление создает цепь однофазного КЗ, что вызывает срабатывание максимальной токовой защиты (за счет протекания тока однофазного КЗ), и поврежденная электроустановка отключается от сети. При этом в промежуток времени от момента замыкания на корпус до отключения электроустановки происходит снижение напряжения корпуса поврежденной электроустановки относительно земли из-за перераспределения напряжения между фазным и нулевым защитным проводниками и наличия повторного заземления нулевого защитного проводника.

Зануление ограничивает время воздействия тока на человека и снижает напряжение прикосновения.

Область применения зануления: трехфазные четырехпроводные сети переменного тока с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ; однофазные двухпроводные сети переменного тока с заземленным выводом; трехпроводные сети постоянного тока с заземленной средней точкой источника.

В качестве максимальной токовой защиты могут применяться: плавкие предохранители или автоматы, устанавливаемые для защиты от токов КЗ; магнитные пускатели со встроенной тепловой защитой; контакторы в сочетании с тепловым реле, осуществляющие защиту от перегрузки; автоматы с комбинированными расцепителями.

Для обеспечения работоспособности зануления проводимость нулевых защитных проводников должна быть выбрана такой, чтобы при замыкании на корпус или на нулевой защитный проводник возникал ток КЗ, превышающий не менее чем: в 3 раза номинальный ток плавкого элемента ближайшего предохранителя; в 3 раза номинальный ток нерегулируемого расцепителя или уставку регули-

руемого расцепителя автоматического выключателя, имеющего обратно зависимую от тока характеристику. При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, проводимость указанных проводников должна обеспечивать ток не ниже уставки тока мгновенного срабатывания, умноженный на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным) и на коэффициент запаса 1,1. При отсутствии заводских данных для автоматических выключателей с номинальным током до 100 А кратность тока КЗ относительно уставки следует принимать не менее 1,4, а для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А — не менее 1,25.

Полная проводимость нулевого защитного проводника во всех случаях должна быть не менее 50% проводимости фазного проводника. На воздушных линиях электропередачи зануление должно быть осуществлено нулевым рабочим проводом, проложенным на тех же опорах, что и фазные провода. На концах воздушных линий (или ответвлений от них) длиной более 200 м, а также на вводах от воздушных линий к электроустановкам, которые подлежат занулению, должны быть выполнены повторные заземления нулевого рабочего провода. При этом в первую очередь следует использовать естественные заземлители, например подземные части опор, а также заземляющие устройства, выполненные для защиты от порогового перенапряжения.

ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЗЕМЛЯЮЩИМ И НУЛЕВЫМ ЗАЩИТНЫМ ПРОВОДНИКАМ

В качестве нулевых защитных проводников должны быть в первую очередь использованы нулевые рабочие проводники. В качестве заземляющих и нулевых защитных проводников могут быть использованы: специально предусмотренные в этих целях проводники; металлические конструкции зданий (фермы, колонны и т.п.); арматура железобетонных строительных конструкций и фундаментов; металлические конструкции производственного на-

значения (подкрановые пути, каркасы распределительных устройств, галереи, площадки, шахты лифтов подъемников, элеваторов, обрамления каналов и т.п.); стальные трубы электропроводок; алюминиевые оболочки кабелей; металлические кожухи и опорные конструкции шинопроводов; металлические коробки и лотки электроустановок; металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений (кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления).

Указанные проводники могут служить единственными заземляющими или нулевыми защитными проводниками, если они по проводимости отвечают требованиям к устройству заземления или зануления и если обеспечена непрерывность электрической цепи на всем протяжении использования.

Заземляющие и нулевые защитные проводники должны быть защищены от коррозии.

Использование металлических оболочек трубчатых проводов, несущих тросов при тросовой электропроводке, металлических оболочек изоляционных трубок, металлоукавов, а также брони и свинцовых оболочек проводов и кабелей в качестве заземляющих или нулевых защитных проводников запрещается. Использование для указанных целей свинцовых оболочек кабелей допускается лишь в реконструируемых городских электрических сетях 220/127 и 380/220 В.

Магистраль заземления или зануления и ответвление от них в помещениях и наружных установках должны быть доступны для осмотра. Исключение составляют: нулевые жилы и оболочки кабелей, арматура железобетонных конструкций, а также заземляющие и нулевые защитные проводники, проложенные в трубах и коробах, непосредственно в теле строительных конструкций.

Заземляющие и нулевые защитные проводники в электроустановках напряжением до 1 кВ должны иметь размеры не менее приведенных в табл. 19.5.

В цепи заземляющих и нулевых защитных проводников не должно быть разъединяющих при-

Т а б л и ц а 19.5

Наименьшие размеры заземляющих и нулевых защитных проводников

Наименование	Медь	Алюминий	Сталь		
			в зданиях	в наружных установках	в земле
Неизолированные проводники, мм ² :					
сечение	4	6	—	—	—
диаметр	—	—	5	6	10
Изолированные провода сечением, мм ²	1,5*	2,5	—	—	—
Заземляющие и нулевые жилы кабелей и многожильных проводов в общей защитной оболочке с фазными жилами сечением, мм	1	2,5	—	—	—
Угловая сталь, толщина полки, мм	—	—	2	2,5	4
Полосовая сталь:					
сечение, мм ²	—	—	24	48	48
толщина, мм	—	—	3	4	4
Стальные водопроводные трубы, толщина стенки, мм	—	—	2,5	2,5	3,5
Стальные тонкостенные трубы, толщина стенки, мм	—	—	1,5	2,5	Не допускается

* При прокладке проводов в трубах сечение нулевых защитных проводников допускается применять равным 1 мм², если фазные проводники имеют то же сечение.

способлений и предохранителей. В цепи нулевых рабочих проводников, если они одновременно служат в целях зануления, допускается применение выключателей, которые одновременно с отключением нулевых рабочих проводников отключают все провода, находящиеся под напряжением.

Однополюсные выключатели следует устанавливать в фазных проводниках, а не в нулевом рабочем проводнике.

Нулевые защитные проводники линий не допускается использовать для зануления электрооборудования, питающегося по другим линиям.

СОЕДИНЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ И НУЛЕВЫХ ЗАЩИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Соединения заземляющих и нулевых защитных проводников должны обеспечивать надежный контакт и выполняться посредством сварки. Допускается в помещениях и наружных установках без агрессивных сред выполнять соединения заземляющих и нулевых защитных проводников другими способами, обеспечивающими требования ГОСТ 10434-82 «Соединения контактные электрические. Общие технические требования» по 2-му классу соединений. При этом должны быть предусмотрены меры против ослабления и коррозии контактных соединений. Соединения заземляющих и нулевых защитных проводников электропроводок и воздушных линий допускается выполнять теми же методами, что и фазных проводников. Соединения заземляющих и нулевых защитных проводников должны быть доступны для осмотра.

ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

Защитное отключение — это автоматическое отключение электроустановки при однофазном (однополюсном) прикосновении к частям, находящимся под напряжением, недопустимым для человека, и (или) при возникновении в электроустановке тока утечки (замыкания), превышающего заданные значения [19.6]. Защитное отключение осуществляется специальными устройствами защитного отключения (УЗО), которые постоянно (в дежурном режиме) контролируют условия поражения электрическим током в электроустановке и отключают их, если возникает опасность поражения человека. Защита при этом осуществляется за счет ограничения времени воздействия тока на человека.

Уставка УЗО — минимальное значение входного сигнала, вызывающего срабатывание УЗО и последующее автоматическое отключение поврежденного участка сети или токоприемника.

Ток утечки в сети с изолированной нейтралью и сети постоянного тока — ток, протекающий между находящейся под напряжением фазой (полусом) и землей в результате снижения сопротивления изоляции; в сети с заземленной нейтралью — ток, протекающий по участку сети параллельно току в нулевом проводе, а при отсутствии нулевого провода — ток нулевой последовательности.

Область применения защитного отключения: любые сети с любым режимом нейтрали. По виду

входного сигнала следует различать УЗО, реагирующие на: ток нулевой последовательности; напряжение нулевой последовательности; ток утечки; напряжение корпуса относительно земли; оперативный ток (постоянный, переменный не промышленной частоты), накладываемый на рабочий ток электроустановки; сумму, разность, фазовые соотношения между током и напряжением нулевой последовательности (или выделенных гармоник напряжения и тока), а также между током или напряжением нулевой последовательности и фазовым напряжением сети; два и более перечисленных фактора (многофакторные УЗО).

Кроме того, все многообразие разработанных и выпускаемых промышленностью УЗО классифицируется по: режиму нейтрали источника питания; роду и частоте тока; напряжению; числу фаз (полусом); мобильности и возможности регулирования уставки; избирательности действия; особенностям монтажа; способу контроля исправности.

Основные параметры характеризующие УЗО: уставка УЗО; время срабатывания; номинальное напряжение; ток нагрузки. УЗО, предназначенные для отключения электроустановок при прикосновении человека к их частям, находящимся под напряжением, должны иметь такие характеристики, чтобы при использовании УЗО в качестве единственного средства защиты или совместно с другими средствами ток через человека (напряжение прикосновения) и время воздействия тока в интервале до 1 с не превышали значений, установленных [19.3].

Значения уставок для сетей с заземленной нейтралью источника питания электроустановок должны выбираться из ряда: 0,002; 0,006; 0,01; 0,02; 0,03; 0,1; 0,3; 0,5; 1,0 А; для сетей с изолированной нейтралью источника питания по ГОСТ 22929-78.

КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ

Контроль изоляции — измерение сопротивления изоляции токоведущих частей электроустановок в целях поддержания их на уровне, обеспечивающем электробезопасность, и предупреждения замыканий на землю и на корпус.

Периодический контроль изоляции — это измерение сопротивления изоляции при приеме электроустановки после монтажа и периодически в сроки, установленные нормативно-технической документацией, или при обнаружении дефектов. При этом измерения сопротивления изоляции проводятся на отключенных электроустановках. Периодический контроль изоляции осуществляется, как правило, мегомметрами. Наиболее широкое применение получили мегомметры типов М1101 на напряжение 100—1000 В; МС-05, МС-06, Ф-2 на напряжение 2500 В; М-503 на напряжение 500 В.

Недостаток такого контроля заключается в том, что в течение некоторого времени возможна эксплуатация электроустановки с пониженным сопротивлением изоляции.

Постоянный контроль изоляции осуществляет специальными устройствами, которые включаются вместе с электроустановкой и автоматически контролируют ее изоляцию, сигнализируя о снижении сопротивления изоляции ниже допустимого уровня. Постоянный контроль изоляции может быть применен в электроустановках любого типа. Однако наиболее широкое применение постоянный контроль нашел в сетях с изолированной нейтралью с помощью устройств типа УАКИ-380; УАКИ-660; АЗАК-380; АЗАК-660; БЗП-1А; АЗПБ; АЗШ-1, -2, -3.

В последнее время вместо указанных устройств выпускается аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР.

Днепропетровским заводом шахтной автоматики выпускается реле утечки РУ-114, состоящее из блока защитного отключения БЗО-1140 и блока компенсации емкостных токов и шунтирования поврежденной фазы БКЗ-1140. Днепропетровским заводом шахтной автоматики серийно выпускаются реле утечки РУ-380; РУ-127/220. Прокопьевским заводом шахтной автоматики выпускается аппарат безопасности экскаваторный комплектный АБЭЭК-1.

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Малым напряжением называется номинальное напряжение (не более 42 В), применяемое в целях уменьшения опасности поражения электрическим током. Малые напряжения (10, 12, 36, 42 В) применяются для питания электроинструмента, светильников стационарного местного освещения и переносных ламп в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных. В качестве источников малого напряжения могут применяться понижающие трансформаторы, батареи гальванических элементов, аккумуляторов, выпрямительные установки и преобразователи. Использовать автотрансформаторы в качестве источников малого напряжения запрещается.

При использовании трансформаторов в качестве источников малого напряжения необходимо обеспечить защиту от перехода напряжения со стороны высшего на сторону низшего напряжения. Если понижающие трансформаторы не являются разделительными, то в зависимости от режима нейтрали сети, питающей первичную обмотку, следует заземлять или занулять корпус трансформатора, а также один из выводов (одну из фаз) или нейтраль (среднюю точку) вторичной обмотки. В особо опасных помещениях применение малых напряжений не может обеспечить полную защиту от поражения электрическим током (особенно при двухфазном прикосновении), поэтому необходимо применение дополнительных средств защиты. Применение малых напряжений ограничено невозможностью создания протяженных сетей и мощных приемников малого напряжения.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СЕТИ

Электрическое разделение сети — разделение электрической сети с помощью разделительного трансформатора на отдельные электрически не

связанные участки, которые предназначены для отделения приемника электроэнергии от первичной электрической сети и сети заземления.

Этот технический способ защиты основан на использовании свойств изоляции в сети с изолированной нейтралью (при больших значениях активного сопротивления и малой емкости фазных проводов относительно земли).

Разделительные трансформаторы применяются в электроустановках напряжением до 1 кВ, напряжение вторичной обмотки при этом не должно превышать 380 В.

При применении разделительных трансформаторов необходимо руководствоваться следующим:

- а) разделительные трансформаторы должны удовлетворять специальным техническим условиям в отношении повышенной надежности конструкции и повышенных испытательных напряжений;
- б) от разделительного трансформатора разрешается питание только одного электроприемника с номинальным током плавкой вставки или расцепителя автоматического выключателя на стороне первичного напряжения не более 15 А;
- в) заземление вторичной обмотки разделительного трансформатора на допускается; корпус трансформатора в зависимости от режима нейтрали сети, питающей первичную обмотку, должен быть заземлен или занулен; заземление корпуса электроприемника, присоединенного к такому трансформатору, не требуется;
- г) понижающие трансформаторы со вторичным напряжением 42 В и ниже могут быть использованы в качестве разделительных, если они удовлетворяют п. а) и б).

ЭЛЕКТРОЗАЩИТНЫЕ СРЕДСТВА

Электрозащитные средства — переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействий электрической дуги и электромагнитного поля. Электрозащитные средства могут быть основными и дополнительными.

Основные электрозащитные средства — средства защиты, изоляция которых длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановок и которые позволяют прикасаться к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Дополнительные электрозащитные средства — средства защиты, дополняющие основные средства, а также служащие для защиты от напряжения прикосновения и напряжения шага, которые сами по себе не могут при данном напряжении обеспечить защиту от поражения током, а применяются совместно с основными электрозащитными средствами.

К основным электрозащитным средствам в электроустановках выше 1 кВ относятся: изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, указатели напряжения, указатели напряжения для фазировки, изолирующие устройства и приспособления для работ на воздушных линиях под напряжением с непосредственным прикоснове-

нием электромонтера к токоведущим частям (изолирующие лестницы, площадки, канаты и т.п.).

К основным электрозащитным средствам, применяемым в электроустановках напряжением до 1 кВ, относятся: изолирующие штанги, изолирующие электроизмерительные клещи, указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками.

К дополнительным электрозащитным средствам напряжением выше 1 кВ относятся: диэлектрические перчатки, диэлектрические боты, диэлектрические ковры, индивидуальные экранирующие комплекты, изолирующие подставки и накладки, диэлектрические колаки, переносные заземления, оградительные устройства, плакаты и знаки безопасности.

К дополнительным электрозащитным средствам напряжением до 1 кВ относятся: диэлектрические галоши, диэлектрические ковры, переносные заземления, изолирующие подставки и накладки, оградительные устройства, плакаты и знаки безопасности. Электрозащитные средства должны быть рассчитаны на применение при наибольшем допустимом рабочем напряжении электроустановки.

Персонал, обслуживающий электроустановки, должен быть снабжен всеми необходимыми средствами защиты, обеспечивающими безопасность его работы.

19.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН

Пожароопасной зоной называется пространство внутри и вне помещений, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие (сгораемые) вещества и в котором они могут находиться при нормальном технологическом процессе или при его нарушении.

Пожароопасные зоны разделяются на четыре класса [19.1].

Зоны класса П-I — зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки выше 61 °С.

Зоны класса П-II — зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются горючие пыль или волокна с нижним концентрационным пределом воспламенения более 65 г/м³ к объему воздуха.

Зоны класса П-IIa — зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества.

Зоны класса П-III — зоны, расположенные вне помещений, в которых обращаются горючие жидкости с температурой вспышки более 61 °С или твердые горючие вещества.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок в пределах до 5 м по горизонтали и вертикали от аппарата, в котором постоянно или периодически обращаются горючие вещества, но технологический процесс ведется с применением открытого огня, раскаленных частей, или технологические аппараты имеют поверхности, нагретые до температуры самовоспламенения горючих паров, пылей

и волокон, не относятся в части их электрооборудования к пожароопасным.

Зоны в помещениях и зоны наружных установок, в которых твердые, жидкие и газообразные горючие вещества сжигаются в качестве топлива или утилизируются путем сжигания, не относятся в части их электрооборудования к пожароопасным.

ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН

Электрооборудование (машины, аппараты, устройства, светильники) и электрические сети, подлежащие размещению в пожароопасных зонах как внутри, так и вне помещений, выбираются в зависимости от класса пожароопасной зоны с учетом классификации горючих материалов (жидкостей, пыли и волокон), а также условий окружающей среды (химическая активность, атмосферные осадки и т.п.).

Зоны в помещениях вытяжных вентиляторов, а также в помещениях приточных вентиляторов (если приточные системы работают с рециркуляцией воздуха), обслуживающих помещения с пожароопасными зонами класса П-II, относятся тоже к пожароопасным зонам класса П-II.

Зоны в помещениях вентиляторов местных отсосов относятся к пожароопасным зонам того же класса, что и обслуживаемая ими зона.

Для вентиляторов, установленных за наружными ограждающими конструкциями, обслуживающих пожароопасные зоны класса П-II и пожароопасные зоны любого класса местных отсосов, электродвигатели выбираются, как для пожароопасной зоны класса П-III.

Электрические машины. В пожароопасных зонах любого класса могут применяться электрические машины с классами напряжения до 10 кВ при условии, что их оболочки имеют степени защиты не менее указанных в табл. 19.6. Воздух для вентиляции электрических машин не должен со-

Т а б л и ц а 19.6

Минимальные допустимые степени защиты оболочки электрических машин в зависимости от класса пожароопасной зоны

Вид установки и условия работы	Степень защиты оболочки для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIa	П-III
Стационарно установленные машины, искрящие или с искрящими частями по условиям работы	IP44	IP54	IP44	IP44
Стационарно установленные машины, не искрящие и без искрящих частей по условиям работы	IP44	IP44	IP44	IP44
Машины с частями, искрящими и не искрящими по условиям работы, установленные на передвижных механизмах и установках (краны, тельферы, электротележки и т.п.)	IP44	IP54	IP44	IP44

держат паров и пыли горючих веществ. Выброс отработавшего воздуха при разомкнутом цикле вентиляции в пожароопасную зону не допускается.

Электрооборудование переносного электрифицированного инструмента в пожароопасных зонах любого класса должно быть со степенью защиты оболочки IP44.

Для обозначения степени защиты применяются буквы IP и следующие за ними две цифры: первая цифра обозначает степень защиты персонала, вторая цифра обозначает степень защиты изделия от попадания воды.

Электрические машины с частями, нормально искрящими по условиям работы (например, с контактными кольцами), должны располагаться на расстоянии не менее 1 м от мест размещения горючих веществ или быть отделены от них несгораемым экраном.

Для механизмов, установленных в пожароопасных зонах, допускается применение электродвигателей с меньшей степенью защиты оболочки, чем указано в табл. 19.6, при следующих условиях:

1) электродвигатели должны устанавливаться вне пожароопасных зон;

2) привод механизма должен осуществляться при помощи вала, пропущенного через стену, с устройством в ней сальникового уплотнения.

Электрические аппараты и приборы. В пожароопасных зонах могут применяться аппараты, приборы, шкафы и сборки зажимов, имеющие степень защиты оболочки не менее указанной в табл. 19.7.

В пожароопасных зонах любого класса могут применяться аппараты, приборы, шкафы и сборки зажимов, продуваемые чистым воздухом под избыточным давлением, а также в маслonaполненном исполнении (за исключением кислородных установок и подъемных механизмов).

Щитки и выключатели осветительных сетей рекомендуется выносить из пожароопасных зон любого класса.

Если в пожароопасных зонах любого класса по условиям производства необходимы электронагревательные приборы, то нагреваемые части их должны быть защищены от соприкосновения с горючими веществами, а сами приборы установлены на поверхности из негорючего материала. В пожароопасных зонах любого класса складских помещений, а также в зданиях архивов и библиотек применение нагревательных приборов запрещается.

Распределительные устройства и подстанции. Установка распределительных устройств напряжением до 1 кВ и выше в пожароопасных зонах любого класса не рекомендуется. При необходимости такой установки степень защиты его элементов (шкафов и т.п.) должна соответствовать табл. 19.7.

В пожароопасных зонах любого класса, за исключением пожароопасных зон в складских помещениях, а также зданий и помещений архивов, музеев, библиотек, допускается на участках, огражденных сетками, открытая установка комплектов трансформаторных и преобразовательных подстанций (КТП, КПП) с трансформаторами

Т а б л и ц а 19.7

Вид установки и условия работы	Степень защиты оболочки для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIa	П-III
Установленные стационарно или на передвижных механизмах и установках (краны, тельферы, электротележки и т.п.), искрящие по условиям работы	IP44	IP54	IP44	IP44
Установленные стационарно или на передвижных механизмах и установках, не искрящие по условиям работы	IP44	IP44	IP44	IP44
Шкафы для размещения аппаратов и приборов	IP44	IP54* IP44**	IP44	IP44
Коробки сборок зажимов силовых и вторичных цепей	IP44	IP44	IP44	IP44

* При установке в них аппаратов и приборов, искрящих по условиям работы. До освоения промышленностью шкафов со степенью защиты оболочки IP54 могут применяться шкафы со степенью защиты оболочки IP44.

сухими или с негорючим заполнением, а также комплектных конденсаторных установок (ККУ) с негорючим заполнением конденсаторов. При этом степень защиты оболочки шкафов КТП, КПП и ККУ до ограждения должна быть не менее IP41 (цифра 1 означает, что должна быть защита от капель воды, падающих вертикально на оболочку).

В пожароопасных зонах любого класса, за исключением пожароопасных зон в складских помещениях, а также помещений архивов, могут размещаться встроенные или пристроенные КТП и КПП с маслonaполненными трансформаторами и подстанции с маслonaполненными трансформаторами в закрытых камерах, сооружаемые в соответствии с требованиями ПУЭ [19.1]. Электрооборудование с масляным заполнением (трансформаторы, батареи конденсаторов, выключатели и т.п.) может устанавливаться на расстоянии не менее 0,8 м от наружной стены здания с пожароопасными зонами при условии, что расстояние по горизонтали и вертикали от проемов в стене здания до установленного электрооборудования будет не менее 4 м.

Электрические светильники. В пожароопасных зонах должны применяться светильники, имеющие степень защиты не менее указанной в табл. 19.8.

Конструкция светильников с лампами ДРЛ должна исключать выпадение из них ламп. Светильники с лампами накаливания должны иметь сплошное силикатное стекло, защищающее лампы. Они не должны иметь отражателей и рассеивателей из сгораемых материалов. В пожароопасных зонах любого класса складских помещений светильники с люминесцентными лампами не должны иметь отражателей или рассеивателей из горючих материалов.

Т а б л и ц а 19.8
Минимальные допустимые степени защиты
светильников в зависимости от класса
пожароопасной зоны

Источники света, устанавливаемые в светильниках	Степень защиты светильников для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIa, а также П-II при наличии местных отсосов и общеобменной вентиляции	П-III
Лампы накаливания	IP53	IP53	2' 3	2' 3
Лампы ДРЛ	IP53	IP53	IP23	IP23
Люминесцентные лампы	5' 3	5' 3	IP23	IP23

П р и м е ч а н и е. Допускается изменять степень защиты оболочки от проникновения воды (2-я цифра обозначения) в зависимости от условий окружающей среды зоны, в которой устанавливаются светильники.

Электропроводка внутри светильников с лампами накаливания и ДРЛ до места присоединения внешних проводников должна выполняться термостойкими проводами.

Переносные светильники в пожароопасных зонах любого класса должны иметь степень защиты не менее IP54; стеклянный колпак светильника должен быть защищен металлической сеткой.

ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ, КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ И ШИНОПРОВОДЫ

Кабели и провода в пожароопасных зонах любого класса должны иметь покров и оболочку из материалов, не распространяющих горение. Применение кабелей с горючей полиэтиленовой изоляцией не допускается.

Через пожароопасные зоны любого класса, а также на расстоянии менее 1 м по горизонтали и вертикали от пожароопасной зоны запрещается прокладывать не относящиеся к данному технологическому процессу (производству) транзитные электропроводки и кабельные линии всех напряжений.

В пожароопасных зонах любого класса применение неизолированных проводов запрещается.

В пожароопасных зонах любого класса разрешаются все виды прокладок кабелей и проводов. Расстояние от кабелей и изолированных проводов, прокладываемых открыто непосредственно по конструкциям, на изоляторах, лотках, тросах до мест открыто хранимых (размещаемых) горючих веществ, должно быть не менее 1 м.

Прокладка незащищенных изолированных проводов с алюминиевыми жилами в пожароопасных зонах любого класса должна производиться в трубах и коробах.

По эстакадам с трубопроводами с горючими газами и жидкостями, проходящим территории с пожароопасной зоной класса П-III, допускается прокладка изолированных проводов в стальных трубах, небронированных кабелей в стальных трубах и коробах, бронированных кабелей открыто.

При этом стальные трубы электропроводки, стальные трубы и короба с небронированными кабелями и бронированные кабели следует прокладывать на расстоянии не менее 0,5 м от трубопроводов по возможности со стороны трубопроводов с негорючими веществами.

Для передвижных электроприемников должны применяться переносные гибкие кабели с медными жилами, с резиновой изоляцией, в оболочке, стойкой к окружающей среде. Соединительные и ответвительные коробки, применяемые в электропроводах в пожароопасных зонах любого класса, должны иметь степень защиты оболочки не менее IP43. Они должны изготавливаться из стали или другого прочного материала, а их размеры должны обеспечивать удобство монтажа и надежность соединения проводов.

Части коробок, выполненные из металла, должны иметь внутри изолирующую прокладку или надежную окраску. Пластмассовые части, кроме применяемых в групповой сети освещения, должны быть изготовлены из труднгорючей пластмассы.

Шинопроводы допускается применять в пожароопасных зонах классов П-I, П-II и П-IIa напряжением не выше 1 кВ. Шинопровод должен иметь медные или алюминиевые шины и обладать степенью защиты не менее IP20. В пожароопасных зонах П-I и П-II все шины, в том числе и шины ответвления, должны быть изолированными. В шинопроводах со степенью защиты IP54 и выше шины допускается не изолировать.

Неразборные контактные соединения шин должны быть выполнены сваркой, а разборные соединения — с применением приспособлений для предотвращения самоотвинчивания. Ответвительные коробки с коммутационными и защитными аппаратами, а также разъемные контактные соединения допускается применять в пожароопасных зонах всех классов. При этом ответвительные коробки, установленные на шинопроводах, включая места ввода кабелей (проводов) и места соприкосновения с шинопроводами, должны иметь степень защиты IP44 и выше для пожароопасных зон классов П-I и П-IIa, IP54 и выше для зон классов П-II.

Для зон классов П-I и П-II должен быть обеспечен опережающий разрыв цепи ответвления в момент коммутации разъемных контактных соединений.

19.4. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК СВЕРХ- И УЛЬТРАВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Известно, что вблизи открытых распределительных устройств и воздушных линий (ВЛ) электропередачи сверх- и ультравысоких напряжений, т.е. 330 кВ и выше, возникают электромагнитные поля большой интенсивности, отрицательно влияющие на биологические объекты.

Установлено, что вредное воздействие на орга-

низм человека электромагнитного поля (ЭМП) промышленной частоты обусловлено в основном одной из его составляющих — электрическим полем, напряженность которого на территории открытых распределительных устройств и вблизи ВЛ на высоте роста человека достигает десятков киловольт на метр. Магнитная составляющая ЭМП 50 Гц также может сказываться на здоровье человека. Однако при обычных условиях обслуживания открытых распределительных устройств и ВЛ, когда человек находится на большом расстоянии от частей, обтекаемых током, напряженность магнитного поля во много раз меньше допустимых значений. Лишь в случае работы под напряжением на проводах ВЛ сверх- и ультравысокого напряжений тело человека, и в первую очередь его руки, оказывается в магнитном поле весьма большой напряженности, что может отрицательно повлиять на его здоровье. Однако норм безопасности для этого случая не разработано.

В целях исключения вредного воздействия электрического поля (ЭП) на человека в нашей стране разработана и введена в действие система организационных и технических мероприятий, основой которых является обеспечение допустимого уровня напряженности электрического поля на рабочих местах персонала и в местах возможного нахождения посторонних людей, а также контроль за соблюдением установленных гигиенических нормативов напряженности электрического поля.

В основе гигиенических нормативов лежит зависимость длительности пребывания человека в электрическом поле без средств защиты от интенсивности поля в месте нахождения человека [19.9; 19.13].

Для персонала, обслуживающего действующие электроустановки, наибольшая напряженность, при которой человеку разрешается работать в электрическом поле без средств защиты, составляет 25 кВ/м, при этом длительность пребывания человека в электрическом поле не должна превышать 10 мин. При напряженности более 25 кВ/м человек должен пользоваться средствами защиты. При напряженности до 5 кВ/м включительно человек может работать без средств защиты в течение всего рабочего дня.

При напряженности от 5 до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания, ч, в электрическом поле без средств защиты вычисляется по формуле

$$T = 50/E - 2,$$

где E — напряженность электрического поля в контролируемой зоне, кВ/м.

Если человек находится без средств защиты в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ продолжительностью соответственно $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, то приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту времени пребывания в электрическом поле нижней границы нормируемой напряженности, определяется выражением, ч,

$$T_n = 8 (t_1/T_1 + t_2/T_2 + t_3/T_3 + \dots + t_n/T_n),$$

где $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ — допустимое время пребывания в электрическом поле для соответствующих контролируемых зон. При этом приведенное время не должно превышать 8 ч (продолжительность рабочего дня).

Для населения предельно допустимая напряженность электрического поля имеет следующие значения:

0,5 кВ/м внутри жилых зданий;

1 кВ/м на территории зоны жилой застройки;

5 кВ/м в населенной местности вне зоны жилой застройки; (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов) а также на территории огородов и садов;

10 кВ/м на участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I—IV категорий;

15 кВ/м в ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья);

20 кВ/м в труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения.

Измерение напряженности электрического поля в действующих установках [19.9] имеет целью определить: истинное значение напряженности на рабочих местах обслуживающего персонала; границы зоны влияния; границы зоны экранирования.

Зоной влияния электрического поля называется пространство, в котором напряженность электрического поля превышает 5 кВ/м.

Зоной экранирования называется пространство вблизи находящихся в электрическом поле зданий и сооружений, а также заземленных металлоконструкций фундаментов под оборудование, силовых трансформаторов и крупногабаритных объектов, в котором напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м.

При проектировании электроустановок значения ожидаемой напряженности электрического поля и границы зон влияния и экранирования определяются по результатам измерений в электроустановках с аналогичными конструктивно-компоновочными решениями, а при отсутствии аналогов — по результатам расчета, которые должны быть проверены впоследствии экспериментально в условиях эксплуатации. Измерения должны производиться в определенных точках интересующего пространства:

а) при работах без подъема на оборудование и конструкции на высоте 4,9 м от земли (при отсутствии средств защиты) и на высоте 0,5; 1,0; 1,8 м от земли (при наличии коллективных средств защиты);

б) при работах с подъемом на оборудование или конструкции на высоте 0,5; 1,0 и 1,8 м от площадки рабочего места и на расстоянии 0,5 м от

заземленных токоведущих частей оборудования (независимо от наличия средств защиты).

Определяющим является наибольшее значение напряженности электрического поля. Во всех случаях должна измеряться напряженность неискаженного поля.

Измерение напряженности электрического поля в электроустановках должно производиться:

- при приемке в эксплуатацию новых электроустановок;
- при организации новых рабочих мест;
- при изменении конструкции электроустановок и стационарных средств защиты от электрического поля;
- при применении новых схем коммутации;
- 1 раз в 2 года в порядке текущего санитарного надзора.

Измерение напряженности электрического поля в местах возможного нахождения людей (населения) производится в целях контроля за соблюдением предельно допустимых значений [19.13]. В открытых пространствах измерение производится на высоте 1,8 м от земли, а в помещениях — 1,8 от пола. Измерения следует производить:

- при приемке в эксплуатацию новых зданий, сооружений и зон организованного пребывания людей вблизи воздушных линий электропередачи;
- после проведения мероприятий по снижению напряженности ЭП в данном месте;
- при определении границ санитарно-защитных зон воздушных линий.

Санитарно-защитной зоной воздушных линий называется территория вдоль трассы воздушной линии, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м.

Расчет напряженности электрического поля воздушных линий электропередачи сравнительно прост. Например, напряженность электрического поля в точке P с координатами x, h (рис. 19.3), создаваемого трехфазной воздушной линией с горизонтальным расположением проводов и изолированными от опор грозозащитными тросами, может быть определена из выражения [19.2]

$$E = \frac{CU_{\Phi}}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{(2K_1 - K_3 - K_5)^2 + 3(K_3 - K_5)^2 + \dots} \\ \rightarrow \dots + (2K_2 - K_4 - K_6)^2 + 3(K_4 - K_6)^2},$$

где C — емкость фазного провода относительно земли, Ф/м; U_{Φ} — фазное напряжение воздушной линии, В;

$$K_1 = \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2}; \quad K_2 = \frac{H-h}{m_A^2} + \frac{H+h}{n_A^2};$$

$$K_3 = \frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2}; \quad K_4 = \frac{H-h}{m_B^2} + \frac{H+h}{n_B^2};$$

$$K_5 = \frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2}; \quad K_6 = \frac{H-h}{m_C^2} + \frac{H+h}{n_C^2}.$$

На рис. 19.4 показаны кривые напряженности электрического поля в середине пролета ВЛ 330—1150 кВ на разных расстояниях от оси линии.

Расчет напряженности электрического поля в распределительных устройствах оказывается более сложным и производится с использованием вычислительной техники. При этом алгоритм расчета основан обычно на использовании метода эквивалентных зарядов [19.10].

Защита персонала, обслуживающего действующие электроустановки сверх- и ультравысокого

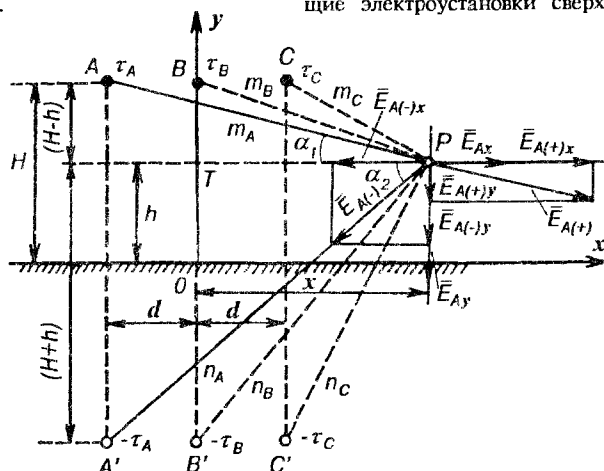


Рис. 19.3. К вычислению напряженности электрического поля вблизи ВЛ с горизонтальным расположением проводов в точке P :

A, B, C — фазы (провода) линии; A', B', C' — зеркальные изображения фаз; $\tau_A, \tau_B, \tau_C, -\tau_A, -\tau_B, -\tau_C$ — линейные плотности зарядов проводов (фаз) и их зеркальных изображений; $\vec{E}_A(+), \vec{E}_A(+)_x, \vec{E}_A(+)_y$ — вектор напряженности электрического поля, обусловленного зарядом $+\tau_A$, и его горизонтальная и вертикальная составляющие; $\vec{E}_A(-), \vec{E}_A(-)_x, \vec{E}_A(-)_y$ — вектор напряженности электрического поля, обусловленного зарядом $-\tau_A$, и его горизонтальная и вертикальная составляющие; $\vec{E}_{Ax}, \vec{E}_{Ay}$ — горизонтальная и вертикальная составляющие вектора напряженности электрического поля, создаваемого фазой A ; H — высота размещения провода над землей; d — расстояние между осями соседних проводов линии; m, n — кратчайшие расстояния от точки P до проводов и их зеркальных изображений.

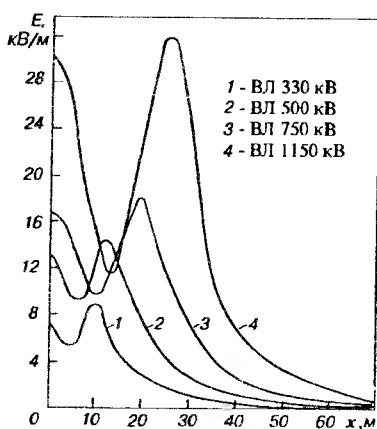


Рис. 19.4. Кривые напряженности электрического поля в середине пролета ВЛ электропередачи с горизонтальным расположением проводов на разных расстояниях от оси линии на высоте 2 м от земли

напряжения, от вредного воздействия электрического поля обеспечивается путем снижения напряженности поля в окружающем человека пространстве до допустимых нормами значений и ограничения времени пребывания в электрическом поле. Средствами защиты являются: комплект специальной одежды (экранирующий костюм) и экранирующие устройства (экраны).

Экранирующий костюм [19.8] является индивидуальным средством защиты от вредного воздействия электрического поля промышленной частоты напряженностью до 60 кВ/м при работах в электроустановках сверх- и ультравысокого напряжения, а также при работах под напряжением на ВЛ 220 кВ и выше.

Защитный принцип экранирующего костюма — электростатическое экранирование пространства, окруженного металлической сеткой. В этом отношении костюм подобен клетке Фарадея. Для надежности экранирования и снятия с металлической сетки возникающего потенциала, сетка заземляется. Экранирующий костюм изготавливается из специальной токопроводящей ткани, в которой, наряду с обычными нитями содержится изолированный микропровод, расположенный в виде сетки. Он представляет собой комплект, состоящий из куртки с капшоном и полукombineзона, а для дежурного персонала подстанций — халат с капшоном.

Для ремонтного персонала дополнительно используются: экранирующий головной убор — каска с электропроводящим покрытием; специальная обувь — ботинки с проводящей подошвой, а при большой напряженности — сапоги и обувь с электропроводящим верхом; перчатки или рукавицы из токопроводящей ткани. Применяются также для экранирования лица (обычно при большой напряженности) съемный экран из мелкой металлической сетки или электропроводящего органического стекла. Токопроводящие элементы всех

деталей экранирующего костюма имеют между собой надежный электрический контакт.

Экранирующие устройства [19.7] в зависимости от их конструкции, размеров и места размещения могут служить индивидуальными или коллективными средствами защиты персонала от воздействия электрического поля на постоянных и временных рабочих местах в электроустановках сверх- и ультравысокого напряжений, а также при работе на транспортных средствах (экранирование рабочего места водителя), в местах прохода людей и т.п.

Защитные свойства экранов основаны на эффекте ослабления напряженности и искажения электрического поля в пространстве вблизи заземленного металлического предмета. Экраны должны снижать напряженность электрического поля в защищаемом пространстве до 5 кВ/м и ниже. В зависимости от назначения и использования экраны бывают стационарными и переносными. Стационарные экраны являются неотъемлемыми частями электроустановок и устанавливаются одновременно с монтажом основного электрооборудования. Они изготавливаются из металлических сеток и прутков, стальных канатов, в виде плоских щитов — козырьков, навесов и перегородок. Стационарные экраны изготавливаются шести типов: межячейковый, шинный, навес у разъединителя, навес над пешеходными дорожками, навес у групповых шкафов и козырек у шкафов. Экраны имеют постоянное заземление.

Переносные экраны применяются при временных работах в открытых распределительных устройствах (в местах, не защищенных стационарными экранами). Они могут изготавливаться в виде переносных съемных щитов и навесов из тех же материалов, что и стационарные экраны. Возможно изготовление их также в виде палаток, зонтов и тому подобных устройств из металлизированной ткани. Согласно [19.7] переносные экраны изготавливаются двух типов: для работы без подъема на высоту и для люлек подъемных механизмов. Экраны заземляются на время их использования путем присоединений к заземляющему устройству открытого распределительного устройства или заземленной конструкции.

Для защиты населения от вредного воздействия электрического поля ВЛ электропередачи сверх- и ультравысокого напряжения санитарными нормами установлены санитарно-защитные зоны ВЛ, границы которых на действующих линиях определяются измерениями напряженности.

Для вновь проектируемых ВЛ с горизонтальным расположением проводов и не оборудованных средствами снижения напряженности электрического поля границы санитарно-защитных зон необходимо установить по обе стороны от воздушной линии на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном ВЛ: 20 м при напряжении ВЛ 330 кВ; 30 м при напряжении ВЛ 500 кВ; 40 м при напряжении ВЛ 750 кВ; 55 м при напряжении ВЛ 1150 кВ.

Считается, что за пределами этих границ напряженность электрического поля не превышает 1 кВ/м.

Для проектируемых ВЛ с иным расположением проводов на опоре границы санитарно-защитных зон могут быть определены расчетом [19.2].

В случае, если на каких-то участках напряженность электрического поля за пределами санитарно-защитной зоны окажется выше предельно допустимой (т.е. выше 0,5 кВ/м) внутри здания и выше 1 кВ/м на территории зоны жилой застройки (в местах возможного пребывания людей), должны быть приняты меры для снижения напряженности путем экранирования, удаления жилой застройки от ВЛ и др.

К размещению ВЛ ультравысоких напряжений (750 и 1150 кВ) предъявляются дополнительные требования по условиям воздействия электрического поля на население. Так, ближайшее расстояние от оси проектируемых ВЛ 750 и 1150 кВ до границ населенных пунктов должно быть, как правило, не менее 250 и 300 м соответственно.

В исключительных случаях допускается приближение этих ВЛ к границам сельских населенных пунктов на меньшие расстояния или пересечение линиями указанных границ при условии:

а) соблюдения габаритов, обеспечивающих напряженность электрического поля под проводами ВЛ не более 5 кВ/м;

б) удаление жилой застройки за пределы санитарно-защитной зоны;

в) заземления металлических изгородей и крыш домов, расположенных в санитарно-защитной зоне. Кроме того, на участке стесненной трассы (ущелья, насыпи и т.п.) указанные расстояния разрешается сократить до значений, принятых для санитарно-защитных зон.

Размещение объектов и производство работ в санитарно-защитной зоне ВЛ должно отвечать требованиям санитарных норм и правил [19.13]. Так, в пределах санитарно-защитной зоны ВЛ запрещается:

а) размещать жилые и общественные здания и сооружения;

б) устраивать площадки для стоянки и остановки всех видов транспорта;

в) размещать предприятия по обслуживанию автомобилей и склады нефти и нефтепродуктов;

г) производить операции с горючим, выполнять ремонт машин и механизмов.

Допускается оставлять в санитарно-защитных зонах действующих ВЛ 330 и 500 кВ жилые здания и приусадебные участки при условии снижения напряженности электрического поля внутри жилых зданий и на открытой территории до 0,5 кВ/м. С этой целью необходимо заземлить металлические кровли зданий не менее чем в двух точках, а на неметаллические кровли установить металлические сетки, также заземленные в двух точках. Сопротивление заземления не нормируется. На открытых территориях напряженность электрического поля может быть снижена путем установки

экранирующих перегородок (железобетонных заборов, тросовых экранов и т.п.) или посадкой деревьев и кустарников высотой не менее 2 м.

Территории санитарно-защитных зон разрешается использовать как сельскохозяйственные угодья, однако рекомендуется выращивать на них культуры, не требующие ручного труда.

На территории санитарно-защитных зон ВЛ 750 кВ и выше запрещается проведение сельскохозяйственных и других работ лицам в возрасте до 18 лет.

Машины и механизмы на пневматическом ходу, находящиеся в санитарно-защитных зонах ВЛ, должны быть заземлены с помощью, например, металлической цепи, соединенной с рамой или кузовом и касающейся земли. Благодаря этому обеспечивается стекание в землю зарядов, наводимых на корпусах машин и механизмов, и тем самым исключаются разряды при прикосновении человека к машинам.

В санитарно-защитных зонах ВЛ 750 и 1150 кВ все машины и механизмы должны, кроме того, иметь экраны для снижения напряженности электрического поля на рабочих местах механизаторов. При необходимости проложить в санитарно-защитной зоне проволоку, например для подвески винограда, ее следует расположить перпендикулярно оси воздушной линии, в результате чего наведенные потенциал и заряд резко уменьшатся. Каждая отдельная проволока должна быть заземлена не менее чем в трех точках. Сопротивление заземления не нормируется.

ПЕРЕМЕННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЧАСТОТОЙ 50 ГЦ

Интенсивное магнитное поле частотой 50 Гц может вызывать нарушения в состоянии здоровья лиц, подвергающихся воздействию этого поля.

Различают непрерывные и прерывистые воздействия поля на работающего. При этом допустимое значение напряженности магнитного поля зависит не только от времени пребывания человека в поле, но и от длительности импульсов $\tau_{\text{и}}$, с, и паузы между ними $\tau_{\text{п}}$, с.

В связи с этим выделяются три вида воздействий:

1 — непрерывные и прерывистые с $\tau_{\text{и}} \geq 0,02$ с, $\tau_{\text{п}} \leq 2$ с;

2 — прерывистые с $60 \text{ с} \geq \tau_{\text{и}} \geq 1 \text{ с}$, $\tau_{\text{п}} > 2 \text{ с}$;

3 — прерывистые с $0,02 \text{ с} \leq \tau_{\text{и}} < 1 \text{ с}$, $\tau_{\text{п}} > 2 \text{ с}$.

В табл. 19.9 приводятся предельно допустимые значения напряженности магнитного поля 50 Гц на рабочих местах.

Воздействие, характеризующееся $\tau_{\text{и}} > 60$ с относится к первому виду.

Измерения напряженности магнитного поля 50 Гц на рабочих местах должны проводиться в следующих случаях:

в порядке текущего надзора не реже 1 раза в год; при испытании и приемке новых образцов оборудования;

Т а б л и ц а 19.9
Предельно допустимые значения напряженности
переменного магнитного поля частотой 50 Гц
(амплитудные значения)

Время, ч	Напряженность магнитного поля, А/м		
	Непрерывные и прерывистые воздействия магнитного поля ($\tau_n \geq 0,02c$; $\tau_n \leq 2c$)	Прерывистые воздействия магнитного поля ($60c \geq \tau_n \geq 1c$; $\tau_n > 2c$)	Прерывистые воздействия магнитного поля ($0,02c \leq \tau_n < 1c$; $\tau_n > 2c$)
До 1,0 (включительно)	6000	8000	10 000
1,5	5500	7500	9500
2,0	4900	6900	8900
2,5	4500	6500	8500
3,0	4000	6000	8000
3,5	3600	5600	7600
4,0	3200	5200	7200
4,5	2900	4900	6900
5,0	2500	4500	6500
5,5	2300	4300	6300
6,0	2000	4000	6000
6,5	1800	3800	5800
7,0	1600	3600	5600
7,5	1500	3500	5500
8,0	1400	3400	5400

при вводе оборудования в эксплуатацию после выполнения наладочных и ремонтных работ.

Если напряженность магнитного поля на рабочем месте окажется выше допустимого значения, следует принять меры защиты, обеспечивающие безопасные условия труда персонала. Защита от опасного воздействия магнитного поля может быть обеспечена:

удалением рабочего места от источника поля на расстояние, при котором напряженность снижается до допустимого значения (защита расстоянием);

ограничением времени пребывания работающего в магнитном поле данной напряженности (защита временем);

экранированием источника поля или рабочего места, обеспечивающим уменьшение напряженности на рабочем месте.

ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Постоянное магнитное поле возбуждается различными магнитными устройствами: электромагнитами, соленоидами, импульсными установками полупериодного или конденсаторного типа, литыми и металлокерамическими магнитами. Наиболее высокая напряженность постоянного магнитного поля наблюдается в зазоре электромагнитов и других устройств, возбуждающих постоянное магнитное поле, а также в рабочей точке литых и металлокерамических магнитов. Напряженность

постоянного магнитного поля в рабочей зоне снижается при удалении от центра магнитного устройства или рабочей точки искусственного магнита.

При работе в условиях воздействия интенсивного постоянного магнитного поля у работающего могут возникнуть серьезные расстройства здоровья. При этом степень воздействия зависит от напряженности поля в рабочем пространстве устройств или рабочей точке искусственного магнита, расположения рабочего места и режима труда.

Чтобы исключить неблагоприятное воздействие постоянного магнитного поля на обслуживающий персонал напряженность поля на рабочем месте не должна превышать предельно допустимого значения, установленного санитарными нормами [19.11] 8 кА/м (100 Э).

Настоящий уровень действителен для различных условий воздействия постоянного магнитного поля на организм человека (непрерывное, прерывистое).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 19.1. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 19.2. Долгин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 19.3. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 19.4. ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования.
- 19.5. ГОСТ 12.1. 030-82. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 19.6. ГОСТ 12.4.155-85. ССБТ. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования.
- 19.7. ГОСТ 12.4.154-85. ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры.
- 19.8. ГОСТ 12.4.172-87. ССБТ. Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от ЭП промышленной частоты. Общие технические требования и методы контроля.
- 19.9. ГОСТ 12.1.002-84. ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
- 19.10. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- 19.11. Предельно допустимые уровни воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами и магнитными материалами. М., 1978. (Минздрав СССР).
- 19.12. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. Харьков, 1986 (НИИ гигиены труда и профзаболеваний).
- 19.13. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты. СН №2971-84 М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Авогадо число 18
Автомат 183
Адаптер 162
— периферийный 181, 184
Активный двухполосник 52
Акустические величины 12
Акцентор 327
Акценторные примеси 21
Алгоритм эксперимента 159
Аморфные материалы 386
Ампер 7, 14
Амплитуда 41
— комплексная 41
Амплитудно-частотная характеристика 55
Аналого-цифровой преобразователь 180
Аналоговая вычислительная машина 138
Аналоговое моделирование 138
Ассемблер 185
Архитектура автоматизированного экспериментального комплекса 15

Б

Байт 180
Баланс мощностей 51
Беккерель 13
Био-Савара закон 80
Больцмана постоянная 18, 20
Буквенные обозначения электрических и магнитных величин 18

В

Валентная зона 21
Вар (вольт-ампер реактивный) 15
Вариации теорема 52
Вариометры 121
Ватт 15
Вебер 15
Веберметры 120
Векторная диаграмма 50
Вентильное свойство 21
Весовая функция 150
Ветвь графа 44
Взаимное преобразование источников энергии 52
Взаимности принцип 51
Виброскорость 280
Вибросмещение 280
Виброускорение 280
Вина постоянная 18
Внутренний фотоэффект 26
Волна в линии 67
— падающая и отраженная 67
Волновое сопротивление 67
Вольт 14
Вольт-ампер 15
Входное сопротивление двухполосника 52
— — линии 68
Выборка 411

Г

Газовая постоянная универсальная 18
Гальваномагнитные тесламетры 120
— эффекты Гаусса 117
— эффекты Холла 117
— явления 24
Гамма 190
Гармоника основная 41
Гармонические составляющие 280, 9
Гаусса эффект 24
Генри 15
Герц 9
Гистерезисметры 123
Гистерезиса явления 366
Гравитационная постоянная 17

Граф сигнальный 53
Граф-схемы (цепи) 44
Грэй 13

Д

Двухполосник 38, 52
Действующее значение 41
Дерево графа 44
Дефектоскоп 394
— акустический 394
— вихреоточковый 395
— магнитный 396
— радиационный 397
— электрический 399
Дефектоскопия 393
— капиллярная 396
Децибел 10
Джозефсона эффект 31
Джоуль 9
Диагностика 409
— автоматическая 409
— тестовая 394
— функциональная 394
Диаграмма громкости 278
Динамические характеристики магнитных материалов 367
Диполь электрический 77
Дискретизация значений наблюдаемой переменной 152
Дисплей алфавитно-цифровой 162
— графический 162
Диффузия носителей заряда 45
Диффузное поле 280
Диэлектрики 304, 307
Диэлектрические материалы газообразные 305, 307, 308
— — жидкие 305
— — искусственные 305
— — неорганические 305
— — органические 305
— — природные 305
— — синтетические 305
— — твердые 305
— — элементоорганические 305
Длина 9
— волны в линии 67
— диффузионная 326
— свободного пробега 326
Донор 327, 10
Донорная примесь 20
Достоверность результатов моделирования 140
Дрейф носителей заряда 22, 24
Дырочная электропроводность 21
Дюамеля интеграл 64

Е

Единицы физических величин 7
Емкостные элементы 39
Емкость электрическая 14
— конденсаторов и проводов 79

Ж

Жидкостной лазер 36

З

Зависимые (управляемые) источники ЭДС и тока 40
Заглушенная камера 280
Запоминающее устройство оперативное 178
— — постоянное 178
Запрещенная зона 20
Запрос прерывания 181
Звуковое давление 278

Зеебека эффект 23
 Зона Бриллюэна 328
 — валентная 326
 — проводимости 326
 — свободная 326
 Зонные структуры 20

И

Измерение 91
 Измеритель 40
 — диэлектрической проницаемости 402
 — радиопомех 289
 — удельной электрической проводимости 402
 Измерительные приборы аналоговые 105
 — — цифровые 100
 Измерительный тракт 150
 Изображение операторное 64, 65
 Индуктивность 15
 — взаимная 15
 Индуктивный элемент 39
 Индукция магнитная 15
 — насыщения 366
 — электрическая 14
 Индустриальные радиопомехи 288, 289
 Интенсивность восстановления 202
 — отказов 201
 Интерфейс 160
 Интерфейсная карта 160
 — система 160
 Инфразвук 276
 Истинное значение физической величины 91
 Истоки графа 53
 Источник тока 39
 — ЭДС 39
 Источники шума и вибрации 277

К

Калория 11
 Кандела 7, 12
 Карбонильное железо 378
 Карсона преобразование 64
 Каскадное соединение черыхполосников 59
 Квадратный метр 9
 Квазипиковое значение 290
 Квантовая электроника 34
 Кельвин 7, 11
 Керамические материалы изоляторные 319, 320, 321
 — — конденсаторные 319, 322, 323, 324
 — — пьезоэлектрические 324, 325
 Керра эффект 25
 Килограмм 7, 9
 Кирхгофа законы 44
 — — для магнитной цепи 71
 Класс точности средств измерений 92
 Классификация магнитных материалов 367
 — методов измерения магнитных величин 117
 Классический метод расчета переходных процессов 62
 Клитцинга постоянная 17
 Коммутатор аналоговый 182
 Коммутации законы 62
 Компенсации принцип 51
 Компилатор 186
 Комплексное магнитное сопротивление 72
 Комплекс унифицированный блочный 188
 Комплексные величины 46
 Компонентные уравнения 41, 46
 Компонировка конструкции 166, 176
 Контроллер 161
 Контроллер обмена 180
 — однокристалльный 182
 — прерывания 181
 — программируемый логический 189
 — прямого доступа к памяти 181
 Контур графа 44
 Контурные уравнения 48
 Концентратор 188

Концентрация 326
 — собственная 326
 Коттона-Мутона эффект 25
 Козрцитивная сила 366
 Козрцитиметры 123
 Коэффициент 412
 — асимметрии 412
 — корреляции 412
 — мощности 51
 — ослабления 67
 — отражения 67
 — фазы 67
 — эксцесса 412
 Крейт 163
 Кривая намагничивания 367
 — размагничивания 367
 Кристалл-фотоэффект 26
 Критерии предпочтения 173
 — — безусловные 173
 — — условные 173
 Критерий подобия 128
 Критическая температура сверхпроводников 27
 КСАП 168
 Кубический метр 9
 Кулон 14
 Кюри точка 23

Л

Лазеры 35
 Лапласа преобразование 64
 Легирование 326
 Линейные напряжения 60
 — токи 60
 — цепи 38
 Линии 67, 239
 Локализованные состояния 342
 Лоренца сила 24
 Лошмидта число 18
 Люкс 12
 Люмен 12
 Люминесценция 26

М

Магистраль адреса 180
 — данных 180
 — управления 180
 Магнетон ядерный 16
 Магнитная вибрация и шум 284
 Магнитная индукция 15
 — постоянная 16
 — проводимость 15
 — проницаемость 15
 Магнитное давление 33
 — сопротивление 15
 Магнитные величины 15
 — измерения 116
 — материалы, испытания 122, 123
 — моменты электрона, протона и мюона 16
 — цепи 71
 Магнитный поток 15
 Магнитогидродинамические уравнения 32
 Магнитодвижущая сила (МДС) 15
 Магнитодиодный эффект 25
 Магнитомодуляционный преобразователь 117
 Магнитокерамические материалы 384
 Магнитомягкие материалы 365
 Магнитооптические явления 25
 Магниторезистивный эффект 25
 Магнитострикционные материалы 382
 Магнитострикционный шум 288
 Магнитострикция 118
 Магнитотвердые материалы 365
 Макроассемблер 185
 Масса 9
 — атома водорода 16
 Масштабы 239
 Материалы диэлектрические 304
 — электроизоляционные 304

Матрицы контуров 45
 — сечений 45
 — узловые 45
 МГД-устройства 33
 Мгновенные значения 38
 Мейснера эффект 29
 Метод 410
 — непараметрический 410
 — параметрический 410
 — последовательных уступок 173
 Метод анализа размерных цепей 177
 — — — — вероятностный 177
 — — — — максимума-минимума 177
 — — — — статистических испытаний 177
 Методы расчета цепей 46
 Метр 7, 9
 Метрология 91
 Механические величины 9,
 Механические тесламетры 121
 Микропроцессор 178
 Микропроцессорная система 178
 Микропроцессорный контроллер 189
 МикроЭВМ 190
 Мини-ЭВМ 190
 Мнемокод 190
 Моделирование 128
 — имитационное 158
 Модель 128
 — гибридная 140
 — математическая прямой аналогии 138
 — системы математическая 154
 — физическая 137
 — электродинамическая, 137
 Модулятор широтно-импульсный 183
 Моль 7
 Момент диполя электрический 77
 — инерции 9
 — силы 9
 Монокристалл 326
 Мост электрический 99
 Мощность 9
 — активная 51
 — комплексная 51
 — полная 51
 — реактивная 51
 Мультипроцессорная система 189

Н

Нагрузка согласованная 67
 Надежность 200
 Наложения принцип 51
 Намагниченность 15
 Намотанные изделия 316
 Напряжение 14
 Напряженность магнитного поля 15
 — электрического поля 14
 Нарботка до отказа 200
 Насосы электромагнитные 84
 Начальные условия 62
 Нейтральный провод 60
 Нелинейные цепи 70
 Непер 8
 Неравенство Чебышева 94
 Нернста эффект 24
 Нернста-Эттингсхаузена эффект 24
 Несимметричные трехфазные системы 61
 Нечеткое множество 171
 Низкочастотный фильтр (фильтр нижних частот) 59
 Нормирование критериев 174

О

Обмен информацией асинхронный 162
 — — байт-последовательный 163
 — — бит-параллельный 163
 — — по прерыванию 162
 — — синхронный 162
 Объем 9

Октавная полоса 280
 Ом 14
 Операторные модели 64
 Операторный метод 64
 Определение допусков на параметры 174
 Оптимизация экспериментального комплекса 147
 — многокритериальная 173
 — параметрическая 170
 Оптические квантовые генераторы 35
 Оригиналы 65
 Ослабления коэффициента 67
 Основные и неосновные носители заряда 21
 Отказ 201
 Отладка аппаратуры 187
 — программы 187
 Отношение заряда электрона к его массе 16
 Оценка 411
 — автокорреляции 412
 — взаимно ковариационной функции 411
 — выборочная 410
 — интервальная 410
 — несмещенная 410
 — состоятельная 411
 — формы кривой плотности распределения 411
 — эффективная 410

П

Параметры электрических процессов 155
 Паскаль 9
 Пельтье эффект 23
 Передаточная функция 53
 Передача графа 53
 Переменных состояния метод 66
 Переходные процессы 62
 — — в нелинейных цепях 72
 — — в цепях с распределенными параметрами 62
 Периодическая вибрация 280
 — система элементов 17
 Периферийное устройство 180
 Пермаллой 368, 377
 Пиннинг 30
 Планирование эксперимента 144, 154
 — — оптимальное 144
 Планка постоянная 18
 Плотность 9
 — тока 74
 Площадь 9
 Поглощающие клещи 289
 Погрешность измерения 91
 — — абсолютная 91
 — — относительная 91
 — — систематическая 94
 — — случайная 93
 Подвижности электронов и дырок 20
 Подвижность носителей заряда 326
 Подобие геометрическое 127
 — математическое 127
 — физическое 127
 Поиск аналогов 170
 Пойнтинга вектор 76
 Поле магнитное 80
 — электрическое 76
 — электромагнитное 74
 Полимерные органические диэлектрики 312
 Полосно-пропускающий фильтр 59
 Полупроводники 326
 — некристаллические 341
 Поляризованность 14
 Помехи в измерительной цепи 97
 Помехозащищенность 289
 Помехообразующий экран 289
 Помехоподавляющие провода 289, 298
 Помехоподавляющий элемент 289
 Порт ввода-вывода 182, 184
 Последовательность нулевая, прямая и обратная 61
 Потенциал векторный 75
 — скалярный 75
 — электрический 14

Потенциальный барьер 22
 Поток магнитный 15
 Потокосцепление 39, 62
 — первичное 157
 Преобразователи измерительные 150
 Принужденная составляющая 63
 Проводимость магнитная 15
 — электрическая 14, 46
 — — активная 46
 — — комплексная 46
 — — реактивная 46
 — — удельная 14
 Программа библиотекарь 187
 — диспетчер 189
 — загрузчик 186
 — имитатор 187
 — монитор 187
 — отладчик 186
 — сервисная 186
 — транслятор 186
 — трассировка 186
 Программатор 187
 Программное обеспечение 185
 — — кроссовое 185
 — — резидентное 185
 Проектирование 165
 — внешнее 166
 — внутреннее 166
 — структурное 165
 — функциональное 166
 Проектное решение 171
 — — допустимое 171
 — — оптимальное 173
 — — эффективное 174
 Проницаемость диэлектрическая 14
 — магнитная 15
 Процесс 412
 — стационарный 412
 — центрированный 413
 — эргономический 413
 Путь графа 53

Р

Работа 9
 Радиальные силы 284
 Радиан 7
 Разложения теорема 64
 Размерные цепи 176
 Размеры 239
 Разрешенная зона 20
 Распиренные узловые уравнения 49
 Реверберационная камера 280
 Реги-Ледюка эффект 24
 Регулятор дифференциальный 184
 — интегральный 184
 — напряжения 184
 — пропорциональный 183
 Резервирование 211
 Резистивный элемент 39
 Резонанс напряжения 56
 — тока 56
 Результат измерения 91
 Рецептор 289
 Ряды тригонометрические 41

С

САПР 167, 168
 Сверхпроводимость 27
 Световые величины 12
 Свободная составляющая 63
 Свободное звуковое поле 280
 Свойства диэлектрических материалов
 — влагостойкость, водостойкость, влагопоглощение 307
 — диэлектрические потери 305
 — дугостойкость 307
 — механические 306
 — нагревостойкость 307

— поляризация 305
 — пробой 306
 — радиационная стойкость 307
 — термические 307
 — трекинговость 307
 — тропикостойкость 307
 — химостойкость 307
 — электрическая прочность 306
 — электрическое старение 306
 — электропроводность 305
 холодостойкость 307
 Связные графы 44
 Сечение графа 44
 Сечение захвата 339
 СИ (система интернациональная) 7
 Сила 9
 Сименс 14
 Симметричная трехфазная система 61
 Симметричные составляющие 61
 Синтез алгоритма эксперимента 152
 — экспериментального комплекса 145
 Система единиц 7
 — — в механике 8
 — проектирования 187
 Скалярный потенциал 75
 Скорость 9
 — угловая 9
 Слоистые пластмассы 314,
 Смещение электрическое 14
 Собственная электропроводность 20
 Соединение звездой 52, 60
 — треугольником 32, 60
 Соотношение Эйнштейна 339
 Сопротивление активное 46
 — комплексное 46
 — магнитное 15
 — реактивное 46
 — удельное 14
 — электрическое 14
 Составляющие симметричные 61
 Спектр 413
 — выборочный 413
 — мощности 413
 Спектральная плотность 41
 Спектральные характеристики 41
 Спектрометр 282
 Средства измерения электрических и магнитных величин 91, 120, 122 — 125
 Средства обеспечения автоматизированного проектирования 168
 — — — информационные 168
 — — — методические 168
 — — — организационные 168
 — — — программные 168
 — — — технические 168
 Стандартизация 196
 Стерadian 8
 Стефана-Больцмана постоянная 18
 Стоки графа 53
 Структурная схема надежности 204
 — функция надежности 204
 Схема 251
 — автоматизированного конструирования 175
 — подключения 253
 — принципиальная 251
 — соединений 253
 — структурная 251
 — функциональная 251
 Схемы замещения 38
 Счетчики электроэнергии 113

Т

Таймер программируемый 181
 Тангенциальные силы 284
 Твердотельный лазер 36
 Температура 11
 Температурный коэффициент удельного сопротивления 22

Теория подобия 127
 Тепловизор ЭДС, 405
 Тепловые величины 11
 ТермоЭДС 23
 Термогальваномагнитный эффект 23
 Термоиндикатор 397
 Терромагнитный эффект 24
 Терморезистивный эффект 22
 Терморезистор 23
 Термоэлектродный эффект 23
 Тесла 15
 Техническое задание 170
 Типовой геометрический элемент 175
 Ток проводимости 74
 — смещения 74
 — электрический 14
 Толщиномер 399
 Томсона эффект 23
 Топографическая векторная диаграмма 50
 Топологические матрицы 45
 — уравнения 44
 Точность средств измерения 92
 Транспонированные матрицы 45
 Трансформация спектра 151
 Трехфазные цепи 60
 Тригонометрический ряд 41

У

Угловая частота 41
 — скорость 9
 Угол плоский 10
 Удельная электрическая проводимость 14
 Удельное электрическое сопротивление 14
 Узловая матрица 45
 Узловые уравнения 48
 — — расширенные 49
 Узлы графа 44
 Умова-Пойнтинга теорема 76
 Унификация 196
 Упорядочение массивов 183
 Управление автоматизированным проектированием 166
 Уравнение Шредингера 328
 Уравнения Максвелла 74
 Уровень Ферми 326
 Усиление квантовое 35
 Ускорение 9
 Условия применения средств измерений 93
 Усреднение воздействия 150
 Установившаяся (принужденная) составляющая 63
 Устройство ввода-вывода 180

Ф

Фаза начальная 41
 Фазные напряжения 60
 Фазочастотная характеристика 55
 Фазы коэффициент 67
 Фарада 14
 Фарадея закон 74
 — число 18
 Ферми потенциал 20
 Ферриты 369, 377, 385
 Феррозондовые преобразователи 118
 — термометры 120
 Ферромагнитный резонанс 118
 Физические величины 7
 — постоянные 16
 Фильтрующие цепи 151
 Фильтры 59
 Форматы 239
 ФотоЭДС 26
 Фотомагнитоэлектрический эффект 26
 Фотопроводимость 339
 Фоторезистивный эффект 26
 Фотоэффект внутренний 26
 Фурье преобразование 41
 — ряд 41

Х

Халькогенидные стекла 340
 Характеристика амплитудно-частотная 55
 — затухания 55
 — фазочастотная 55
 Характеристическое волновое сопротивление 67
 — уравнение 63
 Холла эффект 24

Ц

Цепи постоянного и переменного тока 41
 — нелинейные 38, 70
 — с распределенными параметрами 38, 67
 — с сосредоточенными параметрами 38
 Циклотронный эффект 26
 Цифроаналоговый преобразователь 180
 Цифроаналого-физический комплекс 140

Ч

Частотная селекция 151
 Частотный диапазон 276, 280
 Чертеж 234
 — детали 236
 — жгута 242
 — изделия с обмотками 242
 — интегральной микросхемы 242
 — общего вида 234
 — печатной платы 245
 — сборочный 236
 — электромонтажный 245
 Четырехполюсники 57

Ш

Шоттки диоды 21
 Шрифты 239

Э

Эквивалент сети 289
 Эксперимент в электротехнике 142
 — инженерный 142
 Экспериментальный комплекс 145
 Электрическая постоянная 16
 Электрические величины 14
 — схемы 38
 — цепи 38
 Электрических полей расчеты 76
 Электродвижущая сила (ЭДС) 14
 Электроизоляционные бумаги и картон 311
 — жидкости 308
 — компаунды 315
 — лаки 318
 — лакоткани 318
 — материалы жидкие 307
 — — твердые 310
 — — на основе слюды 317
 Электромагнитное поле 74
 Электромагнитной индукции (Фарадея) закон 74
 Электромагнитные насосы 33
 Электрон-вольт 10
 Электронная электропроводность 20, 21
 Электронно-дырочный переход 21
 Электропроводность проводников и полупроводников 20
 Электротермический (Томсона) эффект 23
 Элементы цепи 38
 Эмулятор 188
 Энергетические зоны 20
 Энергия 9
 — активации 343
 Эффект Холла 336
 Эффект Эттингсхаузена 24
 Эффективная альтернатива 173

Я

Ядерный магнитный резонанс, тесломер на его основе 122
 Языки программирования 185

Справочное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК. Т. 1
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Редакторы Н. Л. Паросва, М. П. Соколова
Художественные редакторы Е. Н. Венедиктова, А. Ю. Землеруб
Технический редактор З. Н. Ратникова
Корректоры Р. М. Ваничкина, В. В. Сомова
Оригинал-макет подготовлен Издательством МЭИ
Оператор Л. А. Смирнова

ЦР № 020528 от 23.04.97 г.

Подписано в печать с оригинала-макета 22.05.95	Формат 70х108 1/16
Бумага офсетная №1	Гарнитура «Таймс»
Усл. печ. л. 38,5	Усл. кр.-отг. 38,5
Тираж 2000 экз. (2-й завод 1001—2000 экз.)	Заказ № 408г
Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14	С-005

Отпечатано в типографии НИИ «Геодезия»
г. Красноармейск Московской обл., ул. Центральная, д. 16