

На правах рукописи



Осипчук Евгений Николаевич

**МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ГЭС
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАМОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Абасов Николай Викторович

Официальные оппоненты: **Иваньо Ярослав Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Иркутская государственная
сельскохозяйственная академия», проректор по
учебной работе

Мокрый Игорь Владимирович,
кандидат технических наук,
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения РАН,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный
технический университет»**

Защита диссертации состоится «22» октября 2013 года в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.017.01 при ИСЭМ СО РАН по адресу: **664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу диссертационного совета Д.003.017.01: **664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.**

Автореферат разослан «20» сентября 2013 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.М. Клер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Межгодовая изменчивость колебаний водности в бассейнах рек вызывает трудности в эффективном управлении режимами водохранилищ гидроэлектростанций (ГЭС).

Традиционно для управления и планирования режимов ГЭС используются два основных методических подхода, основанные на правилах назначения режимов гидроузлов с помощью диспетчерских графиков и расчётах режимов энергосистем с ГЭС на математических моделях различного класса.

Применение диспетчерских графиков позволяет частично снизить риски (энергетические, водохозяйственные, экологические и др.), обусловленные стохастическими колебаниями приточности воды в водохранилища. Однако в условиях глобальных климатических изменений вероятностные методы учёта гидрологической информации, используемые при построении диспетчерских графиков и моделей, не всегда соответствуют реальным процессам речного стока, а накопленной гидрологической статистики может быть недостаточно для учёта рисков наступления экстремальной водности.

При расчётах математических моделей режимов энергосистем с ГЭС обычно используются вероятности развития событий на предстоящий период (например, в виде условных вероятностей показателей водности), при этом прогностические показатели не рассматриваются в явном виде (в частности, в виде функций плотности распределения вероятностей).

Развитие методов прогнозирования, создание глобальных климатических моделей позволяют повышать надёжность прогностических показателей природообусловленных факторов энергетики¹, поэтому актуальной становится задача применения результатов их среднесрочного (от месяца до года) и долгосрочного (от года до нескольких лет) прогнозирования для моделирования возможных режимов ГЭС с оценкой различных рисков.

Современные информационные технологии обеспечивают новые возможности моделирования режимов ГЭС. В частности, методология MDD², широко используемая для автоматизации построения программных комплексов, а также интеграции и адаптации моделей различных предметных областей³, позволяет описывать сложные объекты управления с помощью многоуровневых моделей (метамоделей).

Использование метамоделей позволяет согласовать как традиционные, так и новые подходы к управлению режимами ГЭС, учитывать требования различных участников водохозяйственного комплекса с поиском компромиссных вариантов при противоречиях, что повышает качество принимаемых управленческих решений.

¹ Факторы, в значительной степени зависящие от динамических природных процессов (гидрологических, метеорологических и др.) и влияющие на элементы производства, транспортировки и потребления электроэнергии.

² Model Driven Development (MDD) – модельно-управляемая разработка.

³ Geisler R., Klar M. and Pons C. Dimensions and Dichotomy in Metamodeling. – Univ. of Bradford: 3rd BCS-FACS Northern Methods Workshop, 1998. – 60p.

Цель диссертационной работы – разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения для моделирования режимов сработки и наполнения водохранилищ ГЭС с учётом прогностических распределений показателей приточности и использованием средств метамоделирования.

Задачи исследования:

1. Разработка методических основ применения средств метамоделирования для исследования режимов ГЭС с созданием базы знаний ограничений и критериев синтезируемых моделей;

2. Разработка методики исследования режимов ГЭС на основе распределений вероятностей притока воды в водохранилища;

3. Разработка инструментальных средств метамоделирования режимов ГЭС с созданием декларативного языка описания математических моделей и эффективных (по быстродействию и управлению) программных компонентов;

4. Разработка алгоритма для уменьшения диапазона изменчивости формируемых управленческих показателей режимов ГЭС по заданным прогностическим распределениям притока воды в водохранилища;

5. Разработка программного компонента моделирования водохранилищ для исследования режимов новых и проектируемых ГЭС на основе данных спутникового зондирования рельефа местности.

Объект исследования – информационно-вычислительные технологии управления гидроэнергетическими и водохозяйственными комплексами.

Предмет исследования – модели управления режимами ГЭС.

Методы исследования: математическое программирование, стохастическая оптимизация, имитационное моделирование, математическая статистика, методы системного анализа, проектирования информационных систем, системного и прикладного программирования.

Научную новизну составляют следующие положения:

1. Впервые разработан подход к исследованию режимов ГЭС на основе технологии метамоделирования, позволяющий синтезировать различные модели задач математического программирования с помощью базы знаний разных видов ограничений, критериев и уравнений;

2. Разработан адаптивный алгоритм формирования допустимой для принятия решений области оптимальных режимов ГЭС по заданным функциям распределений вероятностей притока для каждого исследуемого интервала времени на основе стохастической оптимизации;

3. Разработана уникальная технология поддержки исследования режимов ГЭС с набором программных компонентов, включающих декларативный язык описания моделей с возможностью настройки на различные решатели задач математического программирования, поддержкой синтеза, анализа и преобразования моделей.

На защиту выносятся положения, составляющие научную новизну, а также программный компонент формирования характеристик водохранилищ проектируемых ГЭС на основе данных спутникового зондирования рельефа местности с моделированием графиков наполнения водохранилищ.

Практическая значимость. Разработанное методическое, алгоритмическое и программное обеспечение может быть использовано для моделирования режимов ГЭС при уточнении и дополнении действующих «Правил использования водных ресурсов» (ПИВР) водохранилищ, возникновении противоречий между участниками водохозяйственного комплекса: а) Федеральным агентством водных ресурсов Министерства природных ресурсов РФ; б) бассейновыми водными управлениями; в) электрогенерирующими компаниями; г) объединёнными диспетчерскими управлениями; д) научно-исследовательскими институтами энергетического профиля.

Разработанная технология с инструментальными средствами мета-моделирования может применяться для комплексного решения энергетических задач, основанных на задачах математического программирования.

Разработанный программный компонент моделирования водохранилищ ГЭС с формированием графиков их наполнения может использоваться при решении водохозяйственных и водноэнергетических вопросов межведомственными рабочими группами, профильными комитетами (министерствами республик, администрациями краёв и областей).

Результаты диссертационной работы применены при выполнении проектов по гранту РФФИ №10-07-00264 (2010-2012 гг.) и гранту программы президиума РАН №2.2а (2009-2011 гг.).

Результаты, полученные в диссертации, были включены в работу автора, которая победила в молодёжном конкурсе «Энергия развития - 2011» (Москва, ОАО «РусГидро»).

Результаты моделирования, полученные с помощью предложенного автором подхода, были использованы при обсуждении вопросов наполнения Богучанского водохранилища на президиуме СО РАН и в администрации Иркутской области.

Достоверность результатов. Результаты моделирования различных режимов ГЭС верифицировались на статистическом материале по управлению Ангаро-Енисейским каскадом ГЭС и наполнению водохранилища Богучанской ГЭС в 2012 году.

Личный вклад автора. Разработка алгоритмов, программных компонентов и методики их применения принадлежит лично автору, в совместно опубликованных работах технология моделирования режимов ГЭС разработана в нераздельном соавторстве с научным руководителем.

Апробация работы. Содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2010); Международной научно-практической конференции «Реки Сибири и Дальнего Востока» (Иркутск, 2013); Всероссийской конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов» (Барнаул, 2010); Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологический риск и экологическая безопасность» (Иркутск, 2012); Всероссийской конференции «Винеровские чтения» (Иркутск,

2009, 2011); Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск, 2010, 2011, 2012, 2013); Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2010); Научной конференции молодых географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 2011); Конференции-конкурсе научной молодежи ИСЭМ СО РАН (Иркутск, 2010, 2011, 2012).

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 135 наименований и 7 приложений общим объёмом 175 страниц, основной текст изложен на 140 страницах, включает 38 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, приводятся научная новизна и практическая значимость полученных результатов, цели и задачи исследования.

В **первой главе** рассматриваются методические подходы к управлению долгосрочными режимами ГЭС с обзором современных информационно-вычислительных средств для разработки и оптимизации моделей.

На производство и потребление электроэнергии, вырабатываемой ГЭС, существенное влияние оказывают природно-климатические факторы. Например, изменчивость приточности в водохранилища (сезонная, годовая, многолетняя) вызывает риски надёжности функционирования энергосистем с высокой долей выработки электроэнергии ГЭС. Длительные маловодные периоды на водохранилищах в сочетании с холодными зимами нарушают стабильность энергоснабжения и создают угрозы энергетической безопасности.

Для поиска оптимальных вариантов управления режимами ГЭС разработано множество эффективных алгоритмов и методик. Исследования долгосрочных режимов энергосистем с ГЭС проводились в работах: *А.Ю. Александровского, А.Е. Асарина, В.М. Горништейна, Н.А. Картелишвили, А.Ш. Резниковского, Ю.П. Сырова, Е.В. Цветкова, Л.Е. Халяпина, Ш.Ч. Чокина, J. Little, M. Pereira, R. Ferrero, R. Kelman* и др. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН большой вклад в решение данных проблем внесли: *Л.С. Беляев, А.М. Клер, С.И. Паламарчук, В.А. Савельев*⁴ и др.

В зависимости от использования **прогностической информации** можно выделить следующие методические подходы: 1) управление режимами ГЭС на основе диспетчерских графиков, обобщающих накопленную гидрологическую информацию; 2) математические модели, учитывающие безусловную кривую

⁴ автор выражает благодарность В.А. Савельеву за консультации по вопросам управления режимами ГЭС и уточнение постановок задач

статистических распределений стока (прогноз по математическому ожиданию);
3) использование моделей с условными вероятностями показателей водности;
4) применение моделей, учитывающих прогностические показатели притока.

К сожалению, каждый из подходов имеет недостатки. В частности, диспетчерские графики не позволяют учитывать экстремальные условия функционирования ГЭС, включая длительные маловодные периоды. В моделях с условными вероятностями показателей водности большую сложность вызывает оценка точности вероятностей прогнозов, которые существенно меняются в результате глобальных климатических изменений.

Для поиска оптимального варианта управления режимами ГЭС широкое распространение получили методы математического программирования (МП), включая нелинейное и динамическое программирование. Описание речного стока в виде некоторых расчётных значений (например, математических ожиданий) не всегда позволяет получить необходимое решение.

Применение математических моделей, учитывающих прогностические показатели притока в виде распределений вероятностей, позволяет до определенной степени снизить неоднозначность показателей режимов ГЭС, однако для выбора окончательного варианта необходимо "волевое" решение эксперта⁵.

Кроме того, при комплексном исследовании режимов ГЭС обычно рассматривается не одна, а множество моделей. Независимая работа с различными моделями приводит к проблемам их согласования на разных этапах развития. Современные методы разработки с помощью языков и систем моделирования (GAMS, AMPL, MPL и др.) приводят к сложностям интеграции и адаптации моделей при изменении условий функционирования объектов.

Подходы к комплексному решению и описанию математических моделей сложных систем рассматривались в работах *Н.П. Бусленко, И.Н. Коваленко, Е.Ф. Аврамчука, А.А. Вавилова* и др.

Дж. Клиром предложен целостный подход к описанию систем различных предметных областей, предполагающий формализацию семантики и логики общесистемных понятий в виде многоуровневой иерархии моделей. В настоящее время данное направление получило развитие в виде методологий модельно-управляемой разработки (MDD) и архитектуры (MDA), предложенных консорциумом OMG (Object Management Group), формализующих основные этапы построения и развития сложных систем.

В рамках методологии MDD при проектировании сложной системы задаётся несколько уровней абстракции (детализации) моделей и данных, каждый высший уровень целостно и непротиворечиво определяет структуру и связи низших уровней.

Метамодель является инструментальным средством, позволяющим абстрагировать и обобщать синтаксические, семантические и структурные особенности множества моделей некоторой предметной области.

⁵ Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределённости. – Новосибирск: Наука СО РАН, 1978. – 128 с.

Для поддержки принимаемых управленческих решений выбора режимов ГЭС необходимо согласование различных подходов и моделей управления. Применение метамоделей позволяет целостно исследовать множество вариантов функционирования гидрообъекта с учётом различных требований, ограничений, прогностических данных и интервалов времени (включая суточные и месячные режимы ГЭС).

Во второй главе приводится разработанный подход к метамоделированию режимов ГЭС с выделением общих ограничений и критериев синтезируемых моделей.

Для комплексного исследования режимов ГЭС предлагается использовать 4-х уровневую иерархию методологии MDD с рассмотрением следующих уровней: 0-уровень – данные по техническим характеристикам гидрообъекта и основным режимам его функционирования, стоке, прогнозным данным и др.; 1-уровень – математические модели режимов отдельной ГЭС; 2-уровень – метамоделер режимов ГЭС в виде краткого описания связей, отражающего общие фрагменты моделей; 3-уровень – обобщение метамоделей для исследования каскадов ГЭС и энергетических систем.

Метамодель режимов ГЭС предлагается рассматривать в виде описания (с помощью кортежей из теории множеств) следующих объектов задач МП:

$$L^{MP} = (\Phi, S, X, Y(X, S, C, I), \{\Lambda^=\}^L, \{\Lambda^>\}^L, I, C, O), O \subseteq X \cup Y, \quad (1)$$

где Φ – критерий оптимизации, S – множество входных данных и начальных условий, X – вектор переменных, $Y(X, S, C, I)$ – вектор дополнительных расчётных показателей, $\{\Lambda^=\}^L, \{\Lambda^>\}^L$ – множества ограничений-равенств и ограничений-неравенств, I – множество индексов, C – множество констант, O – вектор выходных показателей.

Для описания общих фрагментов моделей вводится хранилище объектов, которое представлено в виде:

$$B^{MP} = (\Phi^M, S^M, X^M, Y^M(X^M, S^M, C^M, I^M), \{\Lambda^=\}^M, \{\Lambda^>\}^M, I^M, C^M, O^M), \quad (2)$$

где объекты метамоделей (1) являются подмножеством объектов хранилища (2).

Из хранилища объектов B^{MP} на основе задания параметров D и метамоделей L^{MP} автоматически синтезируется модель M^{MP} по некоторой заданной процедуре Γ в виде: $M^{MP} = \Gamma(B^{MP}, D, L^{MP})$.

Для создания хранилища объектов моделей режимов ГЭС предлагается следующая классификация ограничений:

1. Технические, определяемые характеристиками гидрообъекта (максимальный расход воды через ГЭС, номинальная мощность и др.);

2. Жёсткие, определяемые характеристиками водохранилищ (уровень мёртвого объёма (УМО), нормальный подпорный уровень (НПУ) и др.) и правилами ПИВР, а также диспетчерскими требованиями;

3. Сезонные (повышенная выработка электроэнергии в зимний период, наполнение водохранилища в летний период, попуски на навигацию, выполнение требований рыболовной отрасли и др.);

4. Экологические и водохозяйственные, включающие минимизацию ущербов и рисков (переполнения верхнего бьефа и затопления нижнего бьефа, оголения водозаборов на водохранилищах и др.);

5. Искусственные управленческие ограничения, принимаемые для задания требуемого режима (дополнительные ограничения на расход, уровни бьефов, выработку электроэнергии и др.).

При моделировании режимов ГЭС данные ограничения объединяются в группы с приоритетами, что при высоких рисках позволяет нарушать некоторые из них (например, сезонные), включая временное превышение показателей (например, НПУ), для выполнения более значимых ограничений.

В зависимости от выбранного периода для отдельной ГЭС задаются различные критерии оптимизации: минимум холостых водосбросов в случае экстремальной водности, максимум стоимости выработанной электроэнергии ГЭС, минимум отклонения от плановой выработки и др.

На основе предложенной классификации разработана метамодель режимов ГЭС (рис. 1), содержащая связи фрагментов различных моделей с общим уравнением водного баланса.

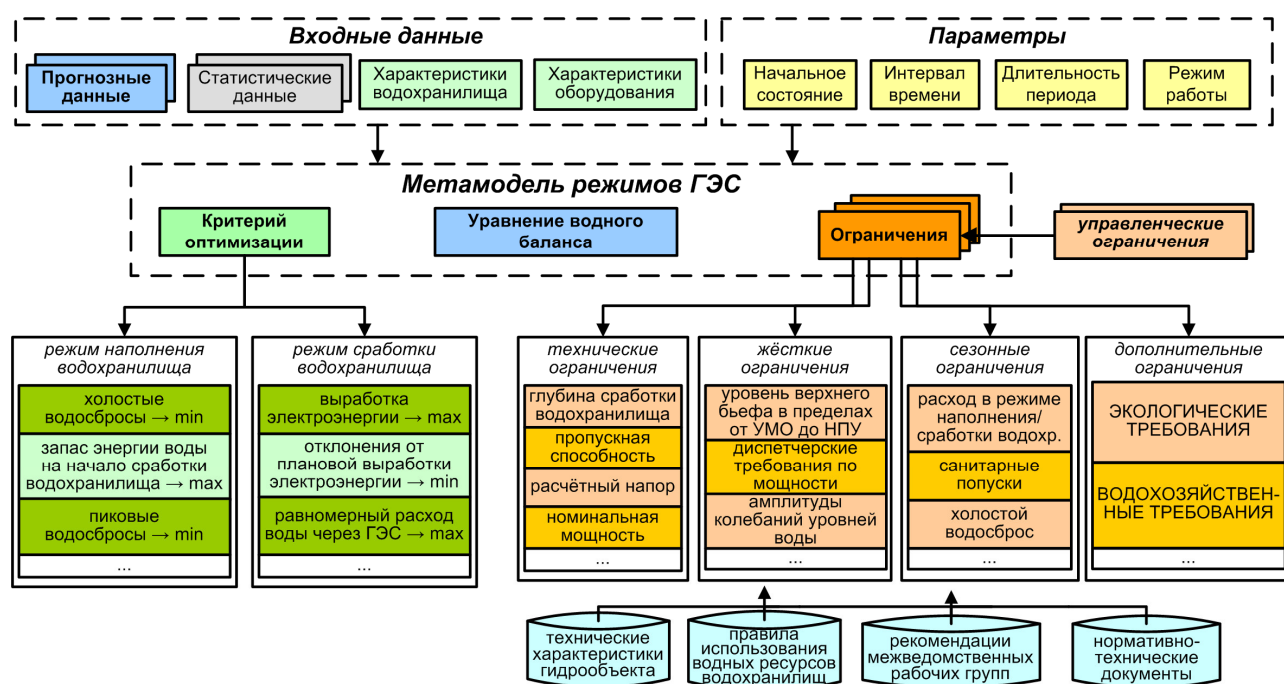


Рис. 1. График метамодели режимов отдельной ГЭС и её составных частей

В диссертационной работе рассматривается задача оптимального управления режимами линейного каскада ГЭС. Для отдельной ГЭС данная задача имеет следующий вид.

По заданной функции полезного притока воды $P(t)$ и начальным уровням верхнего $Z(t_0)$ и нижнего $z(t_0)$ бьефов необходимо найти функции расходов воды через ГЭС $Q(t)$, объёмов водохранилища $V(t)$, уровней верхнего $Z(t)$ и нижнего $z(t)$ бьефов на интервале времени $t \in [t_0, T]$, удовлетворяющих заданному критерию и набору ограничений.

В связи с тем, что функция $P(t)$ имеет стохастическую природу и может иметь различные прогностические распределения вероятностей, а также неточностью измеряемых величин (включая потери на фильтрацию, испарение и подземный сток), модель управления режимами ГЭС представлена в виде задачи МП по некоторым осреднённым показателям для разных периодов времени (сутки, месяц, квартал, год).

Разобьём интервал времени $t \in [t_0, T]$ на N равных периодов τ с постоянными значениями переменных внутри интервалов.

Исходные данные:

$P(t) \rightarrow P = (P_1, \dots, P_N)$ – вектор осреднённых значений полезного притока воды в водохранилище;

$Z(t_0) = Z_0, z(t_0) = z_0$ – начальные уровни верхнего и нижнего бьефов;

Переменные:

$Q(t) \rightarrow Q = (Q_1, \dots, Q_N)$ – вектор осреднённых расходов воды через ГЭС;

$V(t) \rightarrow V = (V_0, \dots, V_N)$ – вектор объёмов водохранилища;

$Z(t) \rightarrow Z = (Z_0, \dots, Z_N), z(t) \rightarrow z = (z_0, \dots, z_N)$ – векторы уровней верхнего и нижнего бьефов;

Уравнение водного баланса для каждого интервала времени имеет вид:

$$V_j - V_{j-1} = \tau \cdot (P_j - Q_j), \quad Q_j \geq 0, \quad V_j \geq 0, \quad j = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Через вектор Q из уравнения водного баланса при известных однозначных для водохранилища функциональных зависимостей $Z = f^v(V), z = f^p(Q)$ можно выразить векторы V, Z, z и следующие показатели:

$E_j = \gamma^E \cdot \tau \cdot W_j$ – выработка электроэнергии ГЭС за период τ ;

$W_j = \gamma^W \cdot g \cdot \eta \cdot q_j \cdot (H_j - H_{j-1}) / 2$ – средняя мощность ГЭС; $H_j = Z_j - z_j$ – напор;

$q_j = Q_j - q_j^u$ – расход через турбины ГЭС, $j = \overline{1, N}$, где $q^u(t)$ – холостой водосброс (определяется исходя из ограничений, например, при пропуске большого объёма воды, превышающего допустимый расход через турбины ГЭС); η – КПД ГЭС; g – ускорение свободного падения; γ^E, γ^W – числовые коэффициенты для перевода размерности.

Задача МП для управления режимами отдельной ГЭС при заданном детерминированном векторе полезного притока имеет следующий вид.

Задача D: для заданного вектора P , критерия оптимизации, множеств ограничений-равенств B и ограничений-неравенств G необходимо найти оптимальный вектор $X = \{Q, V, Z, z, E, W, H, q, q^u\}$ в виде:

$$F(X) \rightarrow \min_X \quad (4)$$

$$B = \{b_k(X) = 0 : k = \overline{1, N^B}\} \quad (5)$$

$$G = \{g_k(X) \geq 0 : k = \overline{1, N^G}\}, \quad (6)$$

где F – некоторая заданная функция; N^B , N^G – количество элементов множеств B и G .

По найденному оптимальному вектору задачи D определяются векторы показателей управления режимов ГЭС (выработка электроэнергии ГЭС, мощность, уровни бьефов и др.).

Для упрощённых оценок режимов ГЭС в летне-осенний период критерий оптимизации можно представить в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^N (c_j^E E_j - c_j^B |E_j^B - E_j| - c_j^U E_j^U) + c^P E^P \rightarrow \max_x, \quad (7)$$

где E_j^B – заданная плановая выработка электроэнергии ГЭС по периодам; E_j^U – потеря электроэнергии на холостом водосбросе; E^P – накопленная энергия воды в водохранилище на конец периода. Задаются следующие коэффициенты условной стоимости: c_j^E – выработки электроэнергии, c_j^B – отклонения от плановой выработки, c_j^U – холостого водосброса, c^P – накопленной энергии.

Ограничения (5-6) включают группы ограничений из предложенной ранее классификации (технические, сезонные и др.) и уравнение водного баланса (3).

Для исследования режимов ГЭС предлагается использовать результаты долгосрочного прогноза полезного притока различных прогностических систем (например, информационно-прогностической системы ГИПСАР⁶). Применение долгосрочного прогнозирования рассматривается, прежде всего, для выявления возможных рисков (энергетических, водохозяйственных, экологических) и определения наиболее опасных периодов, которые могут привести к нарушениям правил ПИВР данного водохранилища.

Прогностические показатели полезного притока предлагается задавать в виде доверительного интервала для каждого рассматриваемого периода с функцией плотности распределения вероятностей по нему. Для применения данных прогностических показателей при моделировании режимов ГЭС определим следующую стохастическую задачу.

Задача S: на основании заданных функций плотности распределений вероятностей $\varphi_j(x)$, $j = \overline{1, N}$ для N периодов генерируется K прогностических траекторий вектора полезного притока P . Для каждой траектории решается задача D .

В результате решения задачи S находятся множества векторов оптимальных переменных и показателей управления режимов ГЭС, их функции плотности распределения вероятностей и диапазоны изменчивости, а также список траекторий P , приводящих к несовместным ограничениям.

Большой диапазон изменчивости прогностических показателей полезного притока, включая многомодальную форму, приводит к сложности выбора

⁶ Абасов Н.В., Бережных Т.В., Резников А.П. Долгосрочный прогноз природообусловленных факторов энергетики в информационно-прогностической системе ГИПСАР // Известия РАН, Энергетика, 2000, №6, С. 22-30.

экспертами некоторого режима ГЭС. Для уменьшения диапазона изменчивости управленческих параметров (прежде всего, расхода воды через ГЭС) предлагается использовать разработанный адаптивный алгоритм синтеза управленческого решения (АСУР) по формированию области допустимых эффективных решений задачи S . Данные решения с заданной вероятностью не нарушают правила ПИВР водохранилища, требования энергосистемы и определённые группы ограничений.

Предлагается в процессе решения задачи S на каждом периоде находить моду выходного распределения, относительно которой в модель добавляются искусственные управленческие ограничения для уменьшения диапазона изменчивости показателя. Данные ограничения также могут задаваться по границам отсекаемых по пороговой вероятности траекторий оптимальных показателей (на предположении, что вероятность одновременного выполнения экстремальных траекторий достаточно мала).

Параметрами алгоритма АСУР являются: 1) начальное состояние уровней верхнего и нижнего бьефов; 2) вероятностные показатели притока; 3) группы и приоритетность включаемых в модель ограничений; 4) допустимый диапазон изменчивости управленческих параметров; 5) пороговая вероятность несовместности ограничений; 6) пороговая вероятность исключаемых экстремальных траекторий; 7) дополнительные параметры управления (количество итераций, шаг дискретизации прогностических показателей и др.).

Выходными данными алгоритма АСУР являются: 1) траектории показателей управления режимов ГЭС, соответствующие заданным требованиям, включая допустимый диапазон изменчивости; 2) вероятностные характеристики показателей режимов ГЭС; 3) множество включённых в модель управленческих ограничений; 4) вероятность несовместности ограничений; 5) множество входных показателей, приводящих к несовместности ограничений (рассматриваются в качестве рисков).

Упрощённо алгоритм АСУР (рис. 2) представлен в виде 3-х базовых блоков:

1) подготовка стохастической задачи S на основе следующих процедур: а) формирование траекторий показателей притока с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ) заданного распределения; б) включение в модель групп ограничений с заданными приоритетами;

2) решение стохастической задачи S по синтезируемому набору траекторий показателей притока, включающей следующие процедуры: а) формирование детерминированной модели по выбранной траектории показателей притока; б) оптимизация модели; в) накопление статистики оптимальных решений и показателей, приводящих к несовместности ограничений;

3) обработка статистики решений с добавлением искусственных управленческих ограничений, задаваемых на основе: а) интервалов относительно наиболее вероятного показателя по всем периодам; б) границ допустимых оптимальных траекторий, исключаемых по некоторой заданной пороговой вероятности.

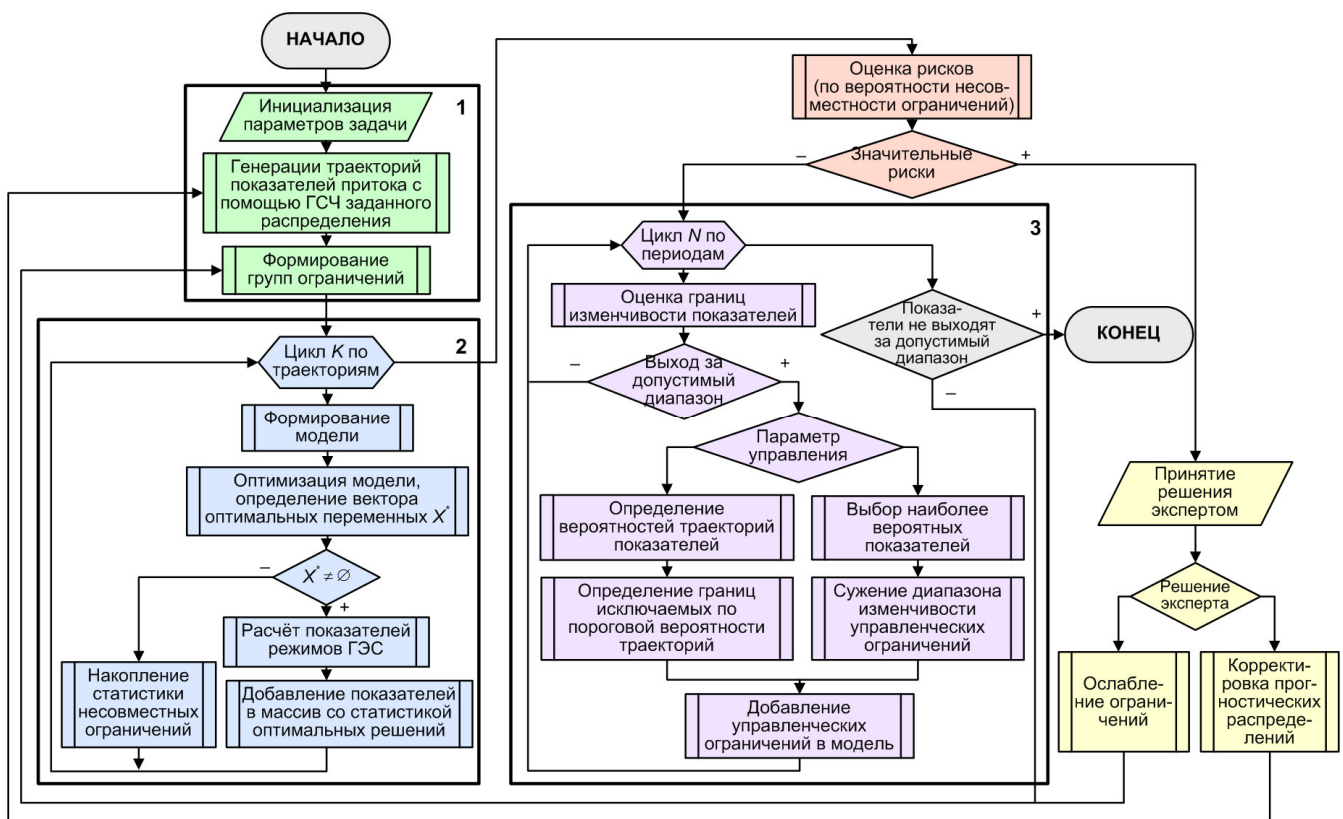


Рис. 2. Блок-схема алгоритма АСУР

В результате выполнения алгоритма АСУР возможны три варианта решений: а) вводимые управленческие ограничения позволяют определить область допустимых решений; б) при заданных параметрах необходимый диапазон управленческих параметров получить нельзя, что требует уточнения прогностических показателей (уменьшение прогностического диапазона); в) при текущих условиях существует большая вероятность несовместности ограничений, поэтому одно или несколько ограничений будут нарушены в зависимости от их приоритета.

На базе алгоритма АСУР разработана методика исследования допустимых эффективных режимов ГЭС, включающая 5 основных блоков:

1. Подготовка метамоделей режимов ГЭС с выявлением групп ограничений, заданием системы приоритетов и формулировкой возможных критериев оптимизации;

2. Подготовка прогностических данных полезного притока в водохранилище ГЭС с заданными доверительным интервалом и плотностью распределений вероятностей на каждом периоде;

3. Синтез набора моделей задачи S с фиксированными значениями входных параметров (например, по нижним и верхним границам изменчивости показателей притока) для отладки ограничений и предварительной оценки области допустимых решений;

4. Выполнение алгоритма АСУР;

5. Принятие решений экспертами в зависимости от выходного состояния алгоритма АСУР, включающих: 1) применимость сформированного режима и допустимость рисков; 2) необходимость корректировки допустимого диапазона

изменчивости управленческих параметров; 3) необходимость корректировки ограничений; 4) необходимость уточнения прогностических показателей.

Данная методика может быть использована в качестве предварительных оценок, на основе которых прогностические данные адаптируются для практического применения и позволяют уменьшить диапазон изменчивости управленческих параметров режимов ГЭС.

Результаты предложенной методики могут быть использованы в мощных программных системах для детальных исследований и оптимизации режимов энергосистем (например, программный комплекс СМПП⁷), включающих каскады ГЭС, ТЭС, тепловые сети и др.

В **третьей главе** приводятся разработанные автором инструментальные средства метамоделирования режимов ГЭС с компактным декларативным языком описания моделей и программными компонентами.

Для управления разными классами моделей режимов ГЭС и исследования различных управленческих ограничений разработан декларативный язык моделирования LMPL (Light Mathematical Programming Language) – облегчённый язык для описания и обработки задач МП.

Язык LMPL основан на идеях декларативного описания логики программ языка ОЛФИС среды программирования ЗИРУС⁸ и обеспечивает упрощенный синтез, модификацию и анализ задач МП. Язык LMPL характеризуется:

- компактной формой декларативного представления задач МП в виде набора базовых блоков (включая уравнения, ограничения, критерии оптимизации) с определением индексных переменных;
- упрощенным синтаксисом (отсутствуют операторы императивных языков программирования);
- возможностью проведения стохастических расчётов с автоматическим построением результирующих графиков и таблиц;
- поддержкой автоматических преобразований моделей для исследования их структуры;
- возможностью подключения внешних программных пакетов для решения задач МП;
- портбельной кроссплатформенной реализацией.

В табл. 1 приведен список базовых блоков языка LMPL с кратким описанием назначения. В диссертационной работе приводится синтаксис языка LMPL в расширенной форме Бэкуса-Наура.

Прикладная модель, записанная по правилам LMPL, после преобразований автоматически приводится к задаче МП с последующей передачей различным решателям (Ip_solve, COPL_QP, QSOpt и др.) и анализом результатов решения. Для совместимости решателей массивы с индексными переменными в исходной задаче заменяются на множества уникальных переменных.

⁷ Клер А. М., Скрипкин С. К., Деканова Н. П. Автоматизация построения статических и динамических моделей теплоэнергетических установок. // Изв. АН. Энергетика. 1996. – № 3. – С.78-84.

⁸ Абасов Н.В. Основы универсальной среды программирования ЗИРУС // Вестник ИрГТУ. – 2006. –№2(26). – С.62-68.

Таблица 1. Базовые блоки языка LMPL с описанием

блок	описание блока
Model	идентификатор модели, опционально указывается класс задачи и предполагаемый решатель
In	входные переменные и их типы: дискретные, свободные и др.
Out	выходные переменные
Const	константы
Opt	целевая функция
Eq	система уравнений, часть уравнений определяется в блоке Var
Var	промежуточные переменные из уравнений блока Eq, Opt, Limit
Limit[N]	различные группы ограничений
Index	пределы для индексных переменных

Созданный инструментарий для метамоделирования режимов ГЭС включает базу знаний фрагментов моделей (элементы различных типов моделей: переменные, константы, критерии оптимизации, ограничения и др.) с конструктором для синтеза выходных моделей на языке LMPL.

Для исследования структуры моделей в язык LMPL включены процедуры автоматического проведения следующих преобразований: построения графов связей объектов; поиска структурного отличия моделей; выделения общих частей моделей; введения новых переменных для упрощения модели; подстановки промежуточных переменных с включением алгебраических символьных преобразований. С помощью данных преобразований синтезируются различные формы представления моделей.

Разработанная технология поддержки исследования режимов ГЭС включает эффективную программную реализацию алгоритма АСУР с применением языка LMPL для описания моделей. Для подготовки стохастических моделей и решения оптимизационных задач выполняются следующие процедуры:

1. Создание контейнеров (наборов) моделей на основе метамоделей режимов ГЭС с помощью ГСЧ заданного распределения для возможности распараллеливания решения;
2. Синтез детерминированных моделей на основе контейнеров моделей;
3. Приведение синтезированных моделей к формату внешнего решателя;
4. Параллельное решение задач МП с помощью внешних решателей и сохранением оптимальных показателей;

Анализ статистики решений и оценка рисков включает процедуры:

1. Идентификация функций плотности распределения вероятностей показателей режимов ГЭС;
2. Определение вероятности несовместности ограничений с возможным ослаблением управленческих ограничений или видоизменением исходной модели при превышении пороговой вероятности;
3. Проверка границ изменчивости показателей режимов ГЭС с добавлением или корректировкой управленческих ограничений в случае несоответствия показателей заданным требованиям;

4. Формирование управленческих решений с автоматическим построением итоговых таблиц и графиков показателей режимов ГЭС.

Данные процедуры реализованы в виде специальных программных компонентов, позволяющих повысить эффективность расчётов моделей со стохастическими параметрами за счёт генерирования необходимого объёма выборок, использования специального ГСЧ с возможностью задания параметров распределения, а также распараллеливания циклов оптимизации (рис. 3).

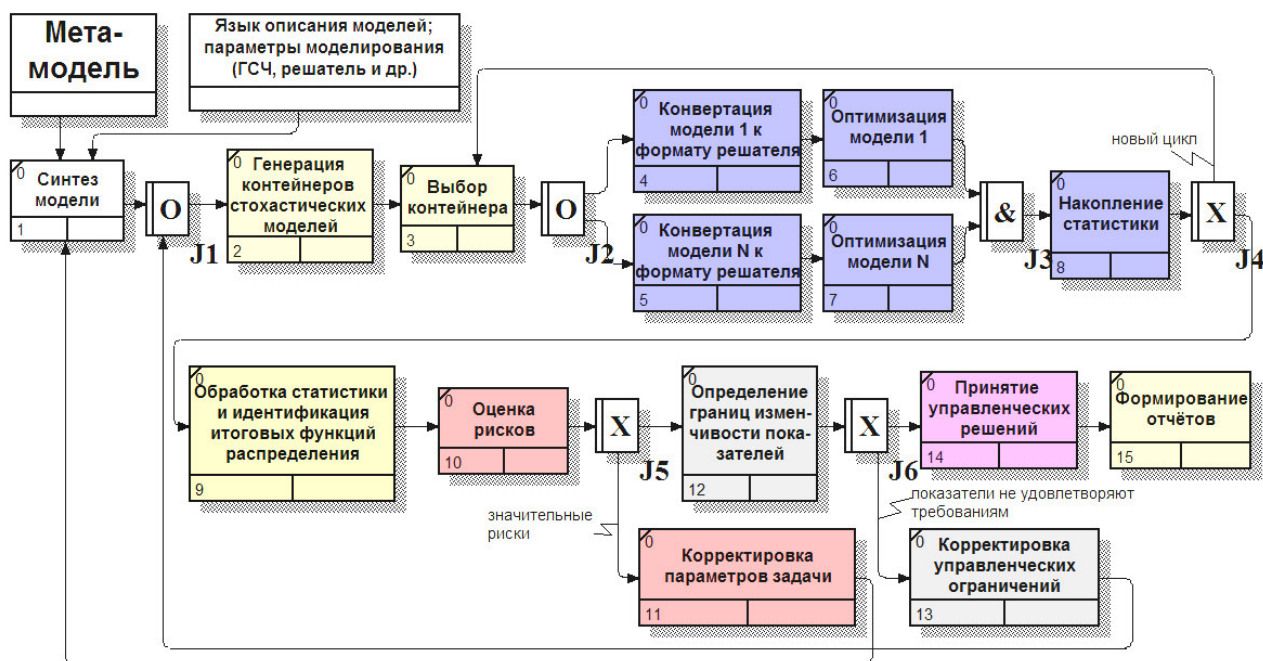


Рис. 3. IDEF3 диаграмма численного метода реализации алгоритма АСУР

Созданный инструментарий включает следующие компоненты: синтеза детерминированных и стохастических моделей; оптимизации моделей с помощью внешних решателей; обработки прогностических данных; накопления статистики решений; построения функций распределений вероятностей показателей; оценки рисков; решения прикладных задач (проверки ограничений, формирования отчётов, графиков и др.).

Реализация компонентов включает открытые портативные программные модули: 1) мультипарадигменный компактный язык программирования *lua* с расширением базовых функций на языках C/C++ для обработки и управления моделями; 2) пакеты *lp_solve* и *QSOpt* для решения задач линейного, целочисленного, смешанного программирования, *COPL_QP* – задач квадратичного программирования; 3) среды *gnuplot* для построения графиков.

Для повышения эффективности расчётов критические для быстродействия функции (например, генерация, обработка и конвертирование LMPL-моделей) вынесены в управляющее ядро языка *lua* с расширением его базовых (API) функций и подключением библиотек внешних решателей.

Для визуализации моделей в математической форме разработан специальный компонент LMPL-TeX, использующий модули системы LaTeX. По заданным правилам термины языка LMPL преобразуются в соответствующее

описание на языке LaTeX. Различные шаблоны визуализации позволяют настраивать последовательность вывода и форму отображения блоков модели. Данный компонент позволяет проводить визуальный анализ модели различным специалистам.

В **четвёртой главе** рассматривается применение разработанных автором компонентов для исследования режимов функционирующих ГЭС и уточнения сроков наполнения проектируемых водохранилищ.

В качестве упрощённого примера приводится модель режима наполнения Иркутской ГЭС с высокой водностью в летне-осенний период по заданным осреднённым месячным показателям притока (апрель-ноябрь) и диапазону плановой выработки электроэнергии в соответствии с требованиями энергосистемы.

При назначении режимов Иркутской ГЭС приоритетным является соблюдение экологических требований для сохранения уникальной экосистемы озера Байкал, поэтому режимы наполнения и сработки водохранилища отличаются большей автономностью по сравнению с другими ГЭС Ангаро-Енисейского каскада.

Текст модели Иркутской ГЭС с комментариями, автоматически сформированный с помощью LMPL-TeX компонента, представлен в виде:

Model : Irk – HPP

$$\boxed{Opt : c^N \cdot E^N + c^E \cdot \sum_{(i)} (E_i) - c^U \cdot \sum_{(i)} (E_i^U) - c^B \cdot \sum_{(i)} (d_i^E) \longrightarrow \max} - \text{критерий оптимизации}$$

In : N = 8 – количество рассматриваемых периодов (месяцев): апрель-ноябрь

– приток Байкала по месяцам (апрель-ноябрь) с диапазонами изменчивости (м³/с)

P = {900_{±800}, 3000_{±1100}, 5000_{±1700}, 5200_{±1500}, 5000_{±1200}, 4000_{±1000}, 1000_{±500}, 300_{±150}}

Z₁ = 456.25 – уровень верхнего бьефа на начало периода (1 апреля) (м)

Z^{min} = 456, Z^{max} = 457 – глубина сработки водохранилища (м)

– плановая выработка электроэнергии ГЭС по месяцам (млрд кВт·ч)

E^b = {0.33, 0.31, 0.31, 0.34, 0.34, 0.35, 0.36, 0.37}

– допустимые отклонения от плановой выработки электроэнергии ГЭС (млрд кВт·ч)

E^d = {0.06, 0.12, 0.09, 0.12, 0.14, 0.12, 0.12, 0.10}

– весовые коэффициенты условной стоимости, $\sum_{(\alpha)} c^\alpha = 1, \alpha = \{N, E, U, B\}$

c^N = 0.2 – запас воды в водохранилище на конец периода

c^E = 0.1 – дополнительная выработка электроэнергии ГЭС

c^U = 0.4 – штраф за холостой водосброс

c^B = 0.3 – соответствие плановой выработке электроэнергии ГЭС

Out : Z_j, Q_i, E_i – выходные показатели

Const : V^a = 15.75, V^b = 75.60 – объёмы водохранилища (км³) из кривой V(Z)

Z^a = 455.50, Z^b = 457.4 – уровни верхнего бьефа (м) из кривой V(Z)

k^Z = (V^b – V^a)/(Z^b – Z^a) – коэффициент линеаризации

k^E = 0.0681 – коэффициент перевода V(км³) → E(млрд кВт·ч) для Иркутской ГЭС

k^V = 30 · 24 · 3600/10⁹ – коэффициент перевода (м³/с) → (км³/месяц)

Eq : P_i^V – Q_i^V = d_i^V – система уравнений изменения объёма водохранилища за i-й месяц

$Var : P_i^V = k^V \cdot P_i$ – приток (км³ за i -й месяц)

$Q_i^V = k^V \cdot Q_i$ – суммарный расход воды через ГЭС (км³ за i -й месяц)

$d_i^V = k^Z \cdot (Z_{i+1} - Z_i)$ – изменение объема водохранилища за i -й месяц

$Q_i = q_i + q_i^U$ – суммарный расход (расход через турбины+холостой водосброс)

$E_i = k^E \cdot k^V \cdot q_i$ – выработка электроэнергии ГЭС за i -й месяц (млрд кВт·ч)

$E_i^U = k^E \cdot k^V \cdot q_i^U$ – потеря энергии на холостом водосбросе за i -й месяц (млрд кВт·ч)

$E^N = k^E \cdot k^Z \cdot (Z_{N+1} - Z^{min})$ – потенциальная энергия воды на конец периода

$d_i^E = |E_i - E_i^b|$ – отклонение фактической выработки электроэнергии ГЭС от плановой

$Limit_1$: – базовые ограничения

$Z_j \in [Z^{min}, Z^{max}]$ – ограничения на глубину сработки водохранилища

$q_i \in [1200, 2800]$ – ограничения на расход воды через турбины ГЭС

$q_i^U \in [0, 1000]$ – ограничения на холостой водосброс

$Limit_2$: – требования энергосистемы

$E_i \in [E_i^b - E_i^d, E_i^b + E_i^d]$ – ограничения на плановую выработку электроэнергии ГЭС

$Limit_3$: – дополнительные ограничения

$q_k^U = 0$ – ограничения на холостой водосброс

$Q_1 \in [1800, 2200], Q_N \in [2000, 2100]$ – ограничения на суммарный расход воды

$Index$: – индексные переменные

$i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N+1}, k = \overline{1, 4}$

В приведённой модели для наполнения водохранилища вводится упрощённый критерий, отражающий условную стоимость: 1) накопленной энергии воды в водохранилище на конец периода; 2) выработки электроэнергии ГЭС по месяцам; 3) штрафов за холостой водосброс; 4) штрафов за отклонение фактической выработки электроэнергии от плановой. Эвристический подбор весовых коэффициентов с добавлением управленческих ограничений задают необходимый режим ГЭС.

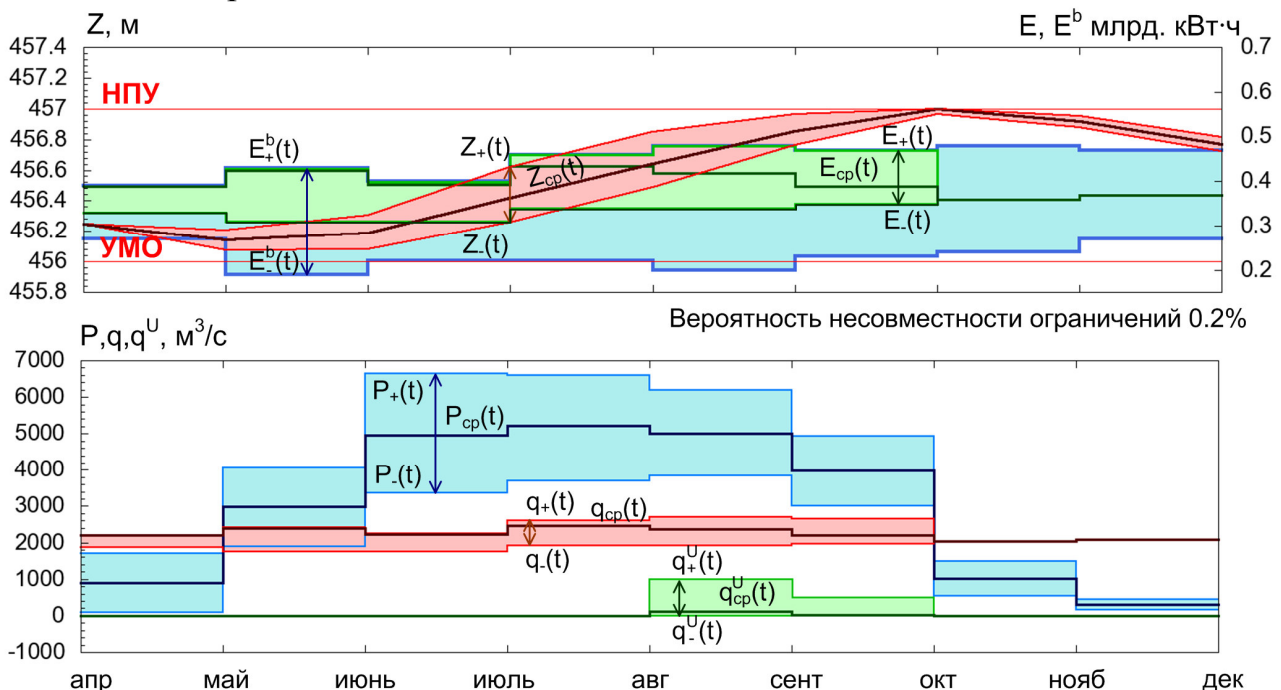


Рис. 4. Результаты моделирования режимов Иркутской ГЭС с высоким притоком воды

По заданным прогностическим распределениям притока и диапазону плановой выработки электроэнергии с помощью программной реализации алгоритма АСУР сформированы итоговые распределения расхода воды через турбины ГЭС, холостого расхода, уровня верхнего бьефа и выработки электроэнергии с оценкой несовместности ограничений. На графиках рис. 4 представлены их средние показатели и диапазоны изменчивости.

На уровень верхнего бьефа в приведённой модели задаются жёсткие ограничения (456-457 м), также может быть введён другой критерий с различными штрафами при превышении некоторого порогового уровня.

Предложенным способом моделируются режимы наполнения и сработки водохранилищ отдельных ГЭС для исследования рисков их функционирования при различных условиях с заданием внешних ограничений энергосистемы или каскадов ГЭС.

В пятой главе приводится применение разработанной технологии для моделирования и уточнения характеристик потенциальных ГЭС.

Развитие методов прогнозирования и прогностических систем позволяет уточнять изменчивость водности для различных створов на ближайшую и долгосрочную перспективу. Появление большого количества открытых ГИС-данных по рекам, озёрам и водохранилищам обеспечивают необходимую информационную поддержку для исследования характеристик потенциальных ГЭС.

Автором разработаны программные компоненты моделирования потенциальных водохранилищ по данным спутникового зондирования рельефа местности (например, открытым данным радарной топографической съёмки поверхности земного шара SRTM⁹ от NASA). С их помощью моделируются режимы потенциальных ГЭС на этапе наполнения и начальной эксплуатации, оцениваются сроки наполнения водохранилищ на основе различных прогнозных данных стока рек.

Моделирование водохранилища включает следующие этапы:

1. Построение растровых и векторных моделей рельефа по точечным данным спутникового зондирования рельефа местности;
2. Выбор опорных узлов на границах створа реки для проектирования простейшей модели плотины;
3. Задание параметров водохранилища;
4. Расчёт характеристик водохранилища с использованием разработанных алгоритмов нахождения площади и объёмов водохранилища;
5. Моделирование наполнения водохранилища в зависимости от прогностических показателей притока.

Разработанные автором алгоритмы формирования контура водохранилища и площади зеркала на заданном уровне верхнего бьефа основаны на развитии идей из машинной графики по рекурсивной закраске замкнутых областей. Задача сводится к вычислению числа узлов водохранилища и граничных с

⁹ Shuttle Radar Topography Mission home page, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>

берегом узлов, принадлежащих области водохранилища при заданной величине верхнего бьефа.

С помощью данных компонентов проведено моделирование 1-го этапа наполнения Богучанского водохранилища (до уровня 185 м) в 2012 году при различных вариантах прогностических показателей притока.

Результаты работы. Основными результатами диссертационной работы являются следующие разработки:

1. Подход к метамоделированию режимов ГЭС на основе многоуровневой иерархии описания моделей задач МП;

2. Методика, технология и инструментальные средства для проведения вычислительных экспериментов моделирования режимов ГЭС с использованием прогностических распределений вероятностей притока воды в водохранилища;

3. Адаптивный алгоритм синтеза управленческого решения выбора режимов ГЭС на основе стохастической оптимизации с распараллеливанием обработки моделей;

4. Декларативный язык описания моделей режимов ГЭС с возможностью подключения различных решателей задач МП и эффективной программной реализацией;

5. Программные компоненты для формирования и уточнения характеристик потенциальных ГЭС с визуализацией проектируемых водохранилищ по данным спутникового зондирования рельефа местности.

На основе разработанной технологии созданы модели для уточнения режимов функционирования отдельных ГЭС и каскадов в различные периоды высокой и низкой водности.

Проведено моделирование наполнения Богучанского водохранилища при разных вариантах прогностических показателей притока воды в водохранилища Ангарского каскада.

Список публикаций автора по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Язык описания метамodelей задач математического программирования и его применение в гидроэнергетике // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2012. – №5 (64). С.8-15.

2. *Абасов Н.В., Каверзина А.В., Осипчук Е.Н., Чернышов М.Ю.* Язык LMPPL как средство синтеза прикладных программных моделей и метамodelей на основе принципов математического программирования // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2013. – №3 (74). С.12-16.

3. *Чернышов М.Ю., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Основы вычислительной технологии для анализа и реструктурирования текстов программ на принципах логико-смыслового анализа и синтеза // Вестник Бурятского государственного университета, 2012. – №9. С.70-75.

В других изданиях

4. *Abasov N.V., Bereznykh T.V., Vetrova V.V., Marchenko O. Yu., Osipchuk E.N.* Analysis and Forecasting of the Baikal Region Hydropower Potential under the Conditions of Variable Climate // Risks and Opportunities of the Energy Sector in East Siberia and the Russian Far East – Edited by: Lee, Kyong Wan; Ko, Sangtu, 2012. P.173-185.

5. *Абасов Н.В., Бережных Т.В., Марченко О.Ю., Никитин В.М., Осипчук Е.Н.* Прогнозирование водности в бассейнах Енисея, Ангары, озера Байкал и моделирование режимов работы ГЭС с учётом трансграничных противоречий // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Реки Сибири и Дальнего Востока» – Иркутск: ИРОО «Байкальская Экологическая Волна», 2013. С. 100-103.

6. *Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н.* О моделировании водохозяйственных рисков на Богучанской ГЭС // Материалы III Всероссийской конференции с международным участием – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. – Т. 2. С. 4-6.

7. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* ГИС-поддержка моделирования гидроэнергетического потенциала проектируемых ГЭС // Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Т.2. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 66-70.

8. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Моделирование эффективной работы проектируемых ГЭС на основе долгосрочного прогнозирования притока // Сборник трудов Десятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Т.4. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 63-67.

9. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Подход к созданию системы моделирования гидроэнергетического потенциала проектируемых ГЭС // Труды XV Байкальской Всерос. конф. "Информационные и математические технологии в науке и управлении". Т.1. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. С. 92-99.

10. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Применение подсистемы моделирования водохранилища для оценки водохозяйственных рисков // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: материалы третьей Всерос. конф. с международным участием.– Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. С. 489-492.

11. *Осипчук Е.Н.* Компонент предварительных исследований режимов работы ГЭС на основе ГИС-данных и долгосрочного прогнозирования притока // Сборник статей молодых учёных Иркутского научного центра Сибирского отделения РАН. – Выпуск 2. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. С. 51-52.

12. *Осипчук Е.Н.* Поддержка исследования режимов работы ГЭС на основе прогностических распределений притока // Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.41 – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. С. 133-139.

13. *Осипчук Е.Н.* Подсистема моделирования водохранилищ потенциальных каскадов ГЭС // Материалы XVII научной конференции

молодых географов Сибири и Дальнего Востока «Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее» (Иркутск, 11-16 апреля 2011г.). – Иркутск: Изд-во Института географии им В.Б.Сочавы СО РАН, 2011. С.217-219.

14. *Осипчук Е.Н.* Расчёт гидроэнергетического потенциала проектируемых ГЭС на основе ГИС-данных и долгосрочного прогнозирования стока. - Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. - (Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.40). С. 91-97.

15. *Осипчук Е.Н.* Язык описания метамоделей для управления режимами ГЭС на основе долгосрочного прогнозирования притока // Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып.42 – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. С.73-79.

16. *Осипчук Е.Н., Абасов Н.В.* Компонент моделирования долгосрочных режимов работы ГЭС // Труды IV Всерос. конф. «Винеровские чтения». Часть I. – Иркутск: ИрГТУ, 2011. С.195-204.

17. *Осипчук Е.Н., Абасов Н.В.* Подход к исследованию долгосрочных режимов работы ГЭС на основе специализированного языка моделирования // Труды XVI Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т.3. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. С. 114-121.

18. *Осипчук Е.Н., Абасов Н.В.* Технология метамоделирования для исследования режимов ГЭС // Труды XVIII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. С. 274-280.

19. *Осипчук Е.Н., Абасов Н.В.* Язык LMPPL для решения прикладных задач математического программирования // Труды XVII Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. С. 261-268.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

20. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Моделирование режимов ГЭС на основе специализированного языка задания моделей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611810, 2013.

21. *Абасов Н.В., Осипчук Е.Н.* Моделирование потенциальных водохранилищ ГЭС по данным спутникового зондирования рельефа // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611614, 2013.

Лицензия ИД №00639 от 05.01.2000. Лицензия ПЛД №40-61 от 31.05.1999.
Бумага писчая. Печать офсетная. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,25.
Подписано в печать 19.09.2013. Тираж 100 экз. Заказ №166.

Отпечатано полиграфическим участком ИСЭМ СО РАН.
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130