

На правах рукописи



Труфакин Сергей Сергеевич

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ
РАБОТЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Красноярск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Пантелеев Василий Иванович

Официальные оппоненты: **Клер Александр Матвеевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук», отдел теплосиловых систем, заведующий отделом.

Мардиханов Айрат Ханифович
кандидат технических наук, акционерное общество «Татэнерго», отдел подготовки информации, отчетности и анализа, инженер I категории.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «20» мая 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных экономических условиях важной задачей является выбор оптимального режима работы гидроэнергетических систем. Заблаговременное определение и планирование выработки электроэнергии гидроэнергетических систем необходимо для повышения экономической эффективности работы, обеспечения надежности работы энергетических систем и более рационального использования водных ресурсов. Все это является основным условием, соблюдение которого дает возможность выполнения предъявляемых современным энергетическим и водохозяйственным комплексом требований.

Учитывая вероятностную природу стока, система заблаговременного определения выработки электроэнергии гидроэнергетических систем, планирования графика ремонтов объектов электросетевого хозяйства и определения показателей баланса электроэнергии и мощности должна учитывать возможность наступления любого притока воды в водохранилища ГЭС и вырабатывать решения на основании показателей комплексной эффективности всех зависящих от режима работы гидроэнергетических систем технологических процессов.

Традиционно на этапах долгосрочного, на периоды в пределах календарного года, планирования балансов энергетических систем применяются подходы и методики, основанные на детерминированном представлении исходных данных и решений. Этому подходу посвящены работы Е.В. Цветкова, Т.М. Алябышевой, Т.А. Филипповой, В.М. Горнштейна, М. Pereira и др. При таком подходе степень учета вероятностной природы стока определяется количеством использованных вариантов исходных данных. Поэтому при определении обоснованных решений, возникает проблема большой размерности задачи.

Из работ, учитывающих вероятностную природу стока, можно отметить работы, основанные на использовании деревьев условий функционирования систем (сценарных деревьев) А. М. Клера, П.Ю. Елсукова, Е. С. Finardi, E.L. Da Silva и др. Сценарные деревья могут порождать оптимизационные задачи большой размерности, поэтому в данных работах в дополнение рассматриваются методы декомпозиции, уменьшающие размерность задач. Решая задачу учета вероятностной природы стока, в работах не рассмотрены задачи согласованности требований к режимам работы гидроэнергетических систем. Поэтому остается неразрешенным вопрос: какие именно требования необходимо соблюдать и в какой степени, если они несопоставимы друг с другом?

В работах А.Х. Мардиханова, В.Н. Шарифуллина разработана и представлена методика, основанная на методе многокритериальной оптимизации, учитывающая наличие несопоставимых ограничений. Методика в соответствии с методом «уступок» определяет компромиссный режим работы гидроэнергетических

систем. При этом степень выполнения зависит от ранжирования требований по важности, что является необходимым при использовании метода «уступок». Однако эта особенность является недостатком, так как ранжирование требований по важности противоречит нормативным документам, в которых указывается только нормативная обеспеченность основных категорий требований.

В рамках направления по рационализации использования водных ресурсов водохранилищ и согласованию стратегий водопользования в работах В.И. Данилов-Данильяна, И.Л. Хранович представлена модель учета вероятностной природы стока, основанная на построении функций эффективности использования водных ресурсов. Приток воды в водохранилища в такой модели представлен характеристикой распределения вероятностей. Применяя функции эффективности использования водных ресурсов, возможно определять показатели эффективности без применения моделей большой размерности. Основным недостатком этой методики в сложности описания зависимостей эффективности, основанных на полном знании о получении эффекта в конкретной отрасли от использования водных ресурсов. Поэтому ее целесообразней использовать для целей проектирования, а не планирования режимов работы гидроэнергетических систем, так как при планировании необходимо исходить из уже определенных требований водопользователей.

На основе анализа работ, посвященных оптимизации режимов работы гидроэнергетических систем и рационализации использования водных ресурсов водохранилищ, отмечая значительные научные результаты, полученные авторами этих работ, следует отметить ряд не до конца решенных задач.

1. В работах по оптимизации режимов энергосистем, включающих ГЭС, рассмотрены только модели с детерминированными исходными данными. Для учета вероятностной природы в исследованиях рассматриваются различные методы прогнозно-ситуационного планирования, диспетчерского управления и сценарных деревьев. Однако такие методы не позволяют обоснованно и точно определить режим гидроэнергетических систем в целях долгосрочного планирования.

2. В работах по рациональному использованию водных ресурсов и согласованию стратегий водопользования рассмотрены стохастические модели, однако исследования ограничены рассмотрением функций эффективности некоторых процессов и в качестве показателя эффективности выбраны экономические показатели. В качестве показателей эффективности для системы управления режимами работы гидроэнергетических систем, экономические показатели не подходят, так как на практике отсутствуют точные связи технологических требований и экономической эффективности процессов.

3. Стохастические модели, описывающие показатели эффективности, целесообразно формировать на основании методологии гарантированного водополь-

зования. Однако методология ограничена рассмотрением только требований поддержания минимальных параметров, в то время как существуют и требования не превышения максимальных параметров.

4. В рассматриваемых работах критерии оптимальности режимов работы гидроэнергетических систем определялись в зависимости от исследуемых авторами задач. В то время как для крупных гидроэнергетических систем критерием оптимальности целесообразнее считать комплексную эффективность всех процессов в составе электроэнергетического и водохозяйственного комплексов.

Таким образом, актуальной научной задачей для управления гидроэнергетическими комплексами является разработка адекватной методики планирования долгосрочных водно-энергетических режимов гидроэнергетических систем, обеспечивающей максимальный эффект от использования электроэнергии в энергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей.

Объект исследования. Гидроэнергетическая система, функционирующая в составе энергетической системы (на примере Ангаро-Енисейского каскада ГЭС, функционирующего в объединенной энергосистеме Сибири).

Предмет исследования. Методики планирования долгосрочных водно-энергетических режимов гидроэнергетических систем.

Цель работы – разработка методики планирования долгосрочных водно-энергетических режимов гидроэнергетических систем, обеспечивающей максимальный эффект от использования электроэнергии в энергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей, с использованием методов стохастической оптимизации.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Анализ особенностей работы гидроэнергетических систем, учитывающий специфику требований энергетического и водохозяйственного комплекса, а также существующих методов планирования долгосрочных режимов гидроэнергетических систем и энергетических систем с большой долей ГЭС.

2. Разработка методики расчета показателей эффективности режимов работы гидроэнергетических систем, учитывающей исходные параметры вероятностной природы и развивающей методологию гарантированного водопользования для расчета показателей рисков нарушения требований на максимальные параметры.

3. Разработка методики и алгоритмов стохастической оптимизации долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем, целевая функция в которой должна сочетать комплексную эффективность всех зависящих от режима работы гидроэнергетических систем процессов.

4. Имитационный расчет оптимальных долгосрочных режимов на примере Ангаро-Енисейского каскада ГЭС, функционирующего в объединенной энергосистеме Сибири, с последующим анализом полученных результатов.

Научная новизна:

1. Предложена и разработана методика оценки режимов работы гидроэнергетических систем, основанная на расчете вероятности нарушения требований энергетического и водохозяйственного комплекса, учитывающая характеристики распределения вероятностей притоков воды в водохранилища ГЭС;

2. Разработаны алгоритмы стохастической оптимизации режимов работы гидроэнергетических систем, обеспечивающей максимальный эффект от использования электроэнергии в энергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей.

3. Разработана методика планирования оптимальных долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем, функционирующих в составе энергетических систем, с использованием алгоритмов стохастической оптимизации.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты исследований позволили разработать новый методический подход к планированию долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем, функционирующих в составе энергетических систем, основанный на использовании вероятностных показателей оценки эффективности режимов работы гидроэнергетических систем и методах стохастической оптимизации.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная методика оценки режимов работы гидроэнергетических систем может быть использована для согласования различных стратегий использования водных ресурсов.

2. Разработанная методика и алгоритмы стохастической оптимизации режимов работы гидроэнергетических систем могут быть использованы в диспетчерских центрах энергосистемы в качестве основы для планирования долгосрочных режимов энергосистем, согласования графиков ремонтов энергетического и электросетевого оборудования и решения других сопутствующих задач. На основании данной оптимизационной методики разработан программный комплекс «Программа расчета оптимальных режимов гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019661972 от 12.09.2019 г.).

3. Разработан программный комплекс «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618953 от 11.08.2017 г.), который используется в Филиале АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири и Филиале АО «СО ЕЭС» Красноярское РДУ на этапах долгосрочного и краткосрочного планирования водно-энергетического

режима работы ГЭС Ангаро-Енисейского каскада и в целом энергетического режима работы объединенной энергосистемы Сибири.

4. Полученные результаты имитационных расчетов Ангаро-Енисейского каскада ГЭС, функционирующего в объединенной энергосистеме Сибири, для притоков воды различной обеспеченности позволяют определить «узкие места», которые необходимо контролировать при управлении режимом работы.

Методы исследования. В работе использованы положения теории вероятности и математической статистики, методы скалярной и многокритериальной оптимизации.

Основные тезисы, выносимые на защиту:

1. Методика оценки режимов работы гидроэнергетических систем учитывает вероятностную природу притока воды в водохранилища и позволяет оценивать стратегии различных водопользователей в едином поле относительных показателей эффективности.

2. Алгоритмы стохастической оптимизации режимов работы гидроэнергетических систем обеспечивают максимальный эффект от использования электроэнергии в энергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей.

3. Методика планирования оптимальных долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем позволяет определять оптимальные режимы работы, с учетом предъявляемых энергетическим и водохозяйственным комплексом требований.

Личный вклад автора заключается в проведении исследований, разработке методик и алгоритмов, выборе методологической и информационной базы, разработке программного комплекса.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работе, соответствует паспорту специальности 05.14.01 – «Энергетические системы и комплексы» и указанным в нём областям исследования:

- разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны;

- использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов, и происходящих в системах энергетических процессов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на III международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.),

VII международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань, 2016 г.), VIII международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Самара, 2017 г.), IX международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань, 2018 г.), международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (г. Саратов, 2013 г.), международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 2018 г.), международной научно-технической конференции «Проминжиниринг» (г. Сочи 2019 г.), всероссийской научно-технической конференции «Борисовские чтения» (г. Красноярск 2019 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 3 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 7 публикаций в прочих изданиях и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы, библиографического списка из 109 наименований и приложений, изложена 193 страницах машинописного текста имеет 55 рисунков, 31 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, тезисы, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В первой главе представлен анализ современных задач и методов планирования режимов работы гидроэнергетических систем, а также дана общая характеристика проблемы определения эффективности гидроэнергетических систем. Отмечено, что большинство водохранилищ имеет многоцелевое назначение, а также выделены основные категории водопользователей.

Проведен аналитический обзор существующих методов планирования долгосрочных режимов гидроэнергетических систем в сочетании с оптимизационными методами. Представлены наиболее известные оптимизационные методы: методы внутренней и внешней точки, методы проекции градиента в совокупности с методом неопределенных множителей Лагранжа, метод Ньютона, метод сценарных деревьев, метод динамического программирования и различные методы векторной оптимизации. Рассмотрены существующие методы прогнозно-

ситуационного планирования и планирования по диспетчерским графикам водохранилищ.

Несмотря на разнообразие методов планирования долгосрочных режимов гидроэнергетических систем остались следующие не решенные вопросы:

- В работах по оптимизации режимов энергосистем, включающих ГЭС, рассмотрены только модели с детерминированными исходными данными. Используемые в настоящее время методы прогнозно-ситуационного планирования и планирования по диспетчерским графикам водохранилищ не позволяют обоснованно и точно определить оптимальный режим работы гидроэнергетических систем;

- В работах по рациональному использованию водных ресурсов и согласованию стратегий водопользования рассмотрены стохастические модели, однако они ориентированы только на задачи проектирования водохранилищ, и не рассматривают многие вопросы планирования режимов работы существующих гидроэнергетических систем, связанные с обеспечением конкретных требований водопользователей, включая обеспечение надежности энергетических систем;

- При планировании режимов работы гидроэнергетических систем отсутствуют показатели комплексной эффективности. Эффективность режимов работы гидроэнергетических систем оценивается только выработкой электроэнергии. Для полноценной оценки комплексной эффективности необходимо оценивать эффективность и других связанных технологических процессов, а также объединять все показатели в единую систему.

На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки методики оценки комплексной эффективности режимов работы гидроэнергетических систем и развития методов оптимизации долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем.

Во второй главе выполнена разработка методики оценки эффективности режимов работы гидроэнергетических систем.

При разработке методики оценки режимов работы гидроэнергетических систем для каждой основной группы водопользователей, была поставлена задача планирования, характеризующая сущность предъявляемых требований. В результате классификации все задачи были разделены на две категории: задачи обеспечения надежности выполнения требований и задачи обеспечения экономической эффективности. В группу задач обеспечения надежности выполнения требований включены задачи, для выполнения которых необходимо обеспечивать допустимость параметров водного или электроэнергетического режима. В группу задач обеспечения экономической эффективности включены задачи, для выполнения которых необходимо обеспечивать максимальную выработку ГЭС или максимальную выручку от продажи электроэнергии. На основании водного баланса водохранилищ, связывающих расходы воды ГЭС, с притоками воды в водохранилища,

лица, а также интегральных характеристик вероятности распределения притоков воды в водохранилища получено общее выражение показателей надежности выполнения требований, а именно рисков нарушения требований.

$$R = p^{-/+}(T \pm W) \quad (1)$$

где $p^{-/+}$ - интегральная характеристика вероятности распределения притоков воды в водохранилище, T – требование водопользователя, выраженное в км³, W – запас объема воды в водохранилище, выраженный в км³.

С физической точки зрения риски нарушения требований определяются вероятностью притока воды, при котором запаса гидроресурсов станет недостаточно для обеспечения тех или иных требований. Особенность обозначения интегральной характеристики вероятности распределения притоков воды в водохранилище (p^+ или p^-) обуславливается следующим фактором: для выполнения требований поддержания минимально допустимого уровня параметров используются характеристики превышения вероятности p^- , а для выполнения требований не превышения максимально допустимого уровня параметров используются характеристики не превышения вероятности p^+ . Графики распределения вероятностей p^- и p^+ представлены на рисунке 1.

В соответствии с различными типами требований, далее представлены выражения рисков нарушения основных категорий требований.

Вероятность нарушения требований поддержания минимального расхода воды:

$$R_{Q_{\min}} = p^- \left[\frac{Q_{\min} \cdot T}{10^9} - (W_{Z_{\text{ВБ0}}} - W_{Z_{\text{ВБмин}}}) \right] \quad (2)$$

где Q_{\min} – минимально допустимый расход воды, $(W_{Z_{\text{ВБ0}}} - W_{Z_{\text{ВБмин}}})$ – выражение, определяющее запас воды в водохранилище от расчетного уровня $W_{Z_{\text{ВБ0}}}$ и минимального $W_{Z_{\text{ВБмин}}}$, T – период времени в секундах.

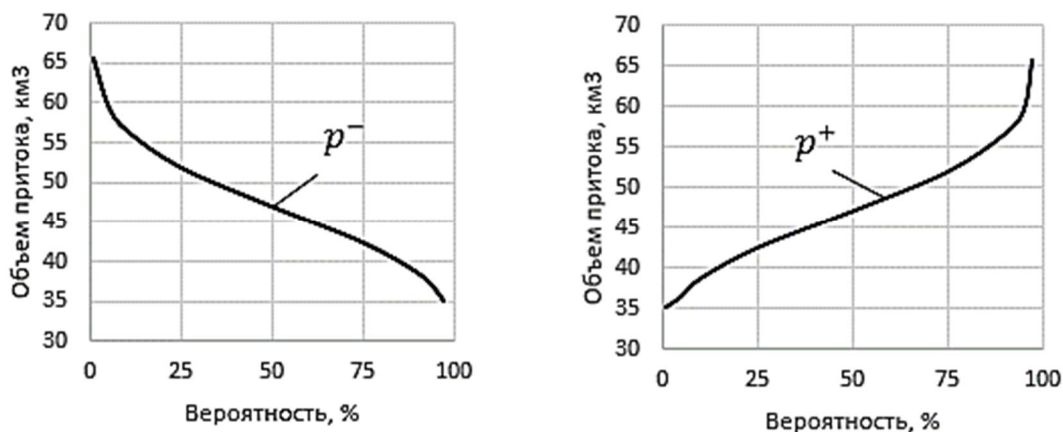


Рисунок 1 - Графики распределения превышения p^- и не превышения p^+ вероятностей притоков воды в водохранилища

Вероятность нарушения требований поддержания минимального уровня воды в нижнем бьефе:

$$R_{Z_{\text{вп}}} = p^{-} \left[\frac{f^{-1}(Z_{\text{min}}) \cdot T}{10^9} - (W_{Z_{\text{ВБ0}}} - W_{Z_{\text{ВБмин}}}) \right] \quad (3)$$

где Z_{min} – требуемый уровень нижнего бьефа ГЭС, $f^{-1}(Z_{\text{min}})$ – характеристика связи расходов воды и уровней воды в нижнем бьефе ГЭС.

Вероятность нарушения требований не превышения максимального расхода воды:

$$R_{Q_{\text{max}}} = p^{+} \left[\frac{Q_{\text{max}} \cdot T}{10^9} + (W_{Z_{\text{ВБmax}}} - W_{Z_{\text{ВБ0}}}) \right] \quad (4)$$

где Q_{max} – максимально допустимый расход воды, $(W_{Z_{\text{ВБmax}}} - W_{Z_{\text{ВБ0}}})$ – выражение, определяющее запас воды в водохранилище от расчетного уровня $W_{Z_{\text{ВБ0}}}$ и максимального $W_{Z_{\text{ВБmax}}}$.

Вероятность нарушения требований обеспечения баланса электроэнергии в энергосистеме:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{Э}_{\text{бmax}}} &= p^{+} \left[\frac{E_{\text{потр}} - E_{\text{др}}^{\text{min}} - E_{\text{сп}}^{\text{max}}}{q \cdot 10^9} + \frac{Q_{\text{х.сбр}} \cdot T}{10^9} - (W_{Z_{\text{ВБmax}}} - W_{Z_{\text{ВБ0}}}) \right] \\ R_{\text{Э}_{\text{бmin}}} &= p^{-} \left[\frac{E_{\text{потр}} - E_{\text{др}}^{\text{max}} - E_{\text{сп}}^{\text{max}}}{q \cdot 10^9} + \frac{Q_{\text{х.сбр}} \cdot T}{10^9} - (W_{Z_{\text{ВБ0}}} - W_{Z_{\text{ВБмин}}}) \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $E_{\text{потр}}$ – потребление электроэнергии, $E_{\text{др}}^{\text{min}}$ – минимальная нагрузка электростанций в энергосистеме, $E_{\text{сп}}^{\text{max}}$ – максимальное значение сальдо-перетока электроэнергии из смежных энергосистем, q – удельный расход ГЭС.

Вероятность нарушения требований не превышения максимальных перетоков мощности в сечениях электрической сети:

$$R_{\text{МДП}} = p^{+} \left[\left(\frac{P^1_{\text{ГЭС}}}{q} + Q_{\text{х.сбр}} \right) \cdot \frac{T}{10^9} - (W_{Z_{\text{ВБmax}}} - W_{Z_{\text{ВБ0}}}) \right] \quad (6)$$

где $P^1_{\text{ГЭС}}$ – мощность ГЭС, при которой переток мощности в сечении электрической сети равен максимальному значению.

В связи со сложностью топологии электрической сети энергосистемы для определения мощности ГЭС, при которой переток мощности в сечении электрической сети равен максимальному значению, предложено использовать теорию чувствительности. В третьей главе представлена процедура выражения матрицы чувствительности, которая определяет связи между генерацией в узлах и перетоками мощности в ветвях расчетной модели для линейных уравнений установившегося режима. На основании теории чувствительности требуемые связи описываются выражением:

$$\frac{dP_{\text{ГЭС}}}{dP_{\text{КС}}} = -U_0 \cdot Y_d \cdot M^T \cdot Y^{-1} \cdot \frac{\partial W}{\partial D} \quad (7)$$

где U_0 – базисное напряжение, Y_d – диагональная матрица проводимостей ветвей, M^T – транспонированная матрица инцидентности, Y^{-1} – обратная матрица Якоби

или, для линейных уравнений установившегося режима, обратная матрица узловых проводимостей, $\partial W/\partial D$ – матрица частных производных вектор-функции по исходным данным.

В результате мощность ГЭС, при которой переток мощности равен максимальному значению, определяется по выражению:

$$P^1_{ГЭС} = P^0_{ГЭС} + \frac{dP_{ГЭСi}}{dP_{КСj}} \cdot P_{зап} \quad (8)$$

где $P^0_{ГЭС}$ – мощность ГЭС в предварительном расчете электроэнергетического режима, $dP_{ГЭСi}/dP_{КСj}$ – коэффициент связи между изменением мощности узла i генерации и перетоком мощности в сечении электрической сети j , $P_{зап}$ – запас мощности, определяемый как разница между $P_{макс}$ и $P^0_{ГЭС}$.

Кроме этого, описаны особенности расчета рисков нарушения требований для каскадов ГЭС и приведены примеры расчета рисков для Ангаро-Енисейского каскада ГЭС, результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунках 2-4.

Графики показывают риски невыполнения требований для каждого расчетного интервала и являются эффективным инструментом как при оценке режимов работы гидроэнергетических систем, так и при их оптимизации.

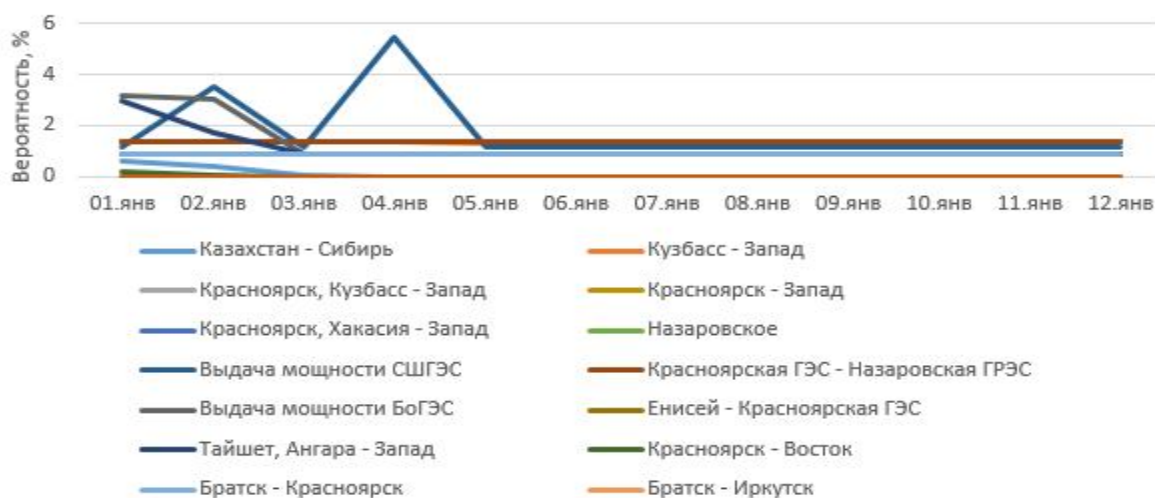


Рисунок 2 – Графики рисков нарушения требований не превышения перетоков мощности в контролируемых сечениях энергосистемы

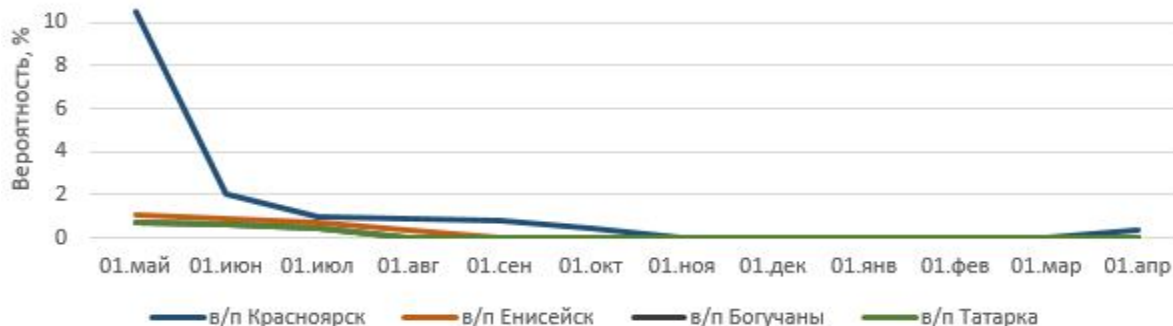


Рисунок 3 – Графики рисков нарушения требований обеспечения уровней воды по водпостам (в/п) для водного транспорта

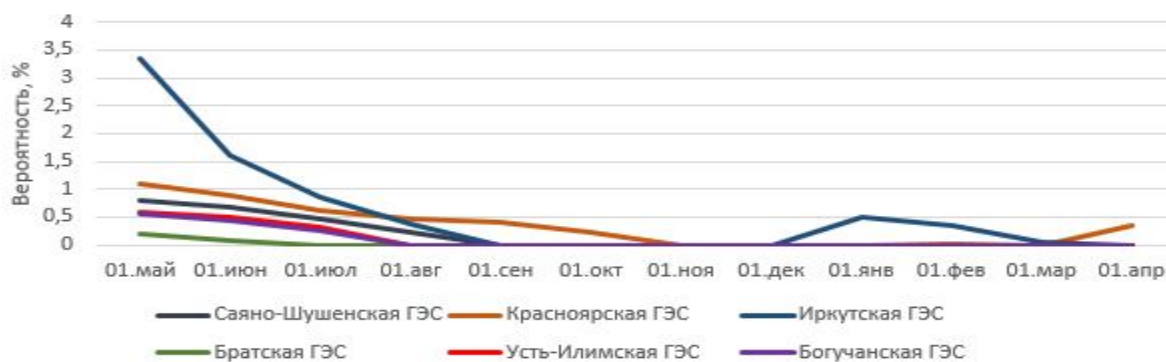


Рисунок 4 – Графики рисков нарушения требований обеспечения расходов воды для водоснабжения

Экономический эффект отличается от рисков нарушения требований детерминированной интерпретацией через показатели выработки электроэнергии. Для возможности сравнения всех факторов экономический эффект определен через относительные показатели в сравнении с максимально возможным, который отображает недополученный экономический эффект:

$$\mathcal{E} = \frac{(\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_{\text{план}})}{\mathcal{E}_{\max}} \quad (9)$$

где \mathcal{E}_{\max} – максимальный экономический эффект, $\mathcal{E}_{\text{план}}$ – плановый экономический эффект.

Расчет максимального экономического эффекта выполнен в виде оптимизационного расчета с целевой функцией, соответствующей максимизации выработки электроэнергии ГЭС. Выражения, характеризующие этапы оптимизационного процесса также подробно описаны в главе.

В третьей главе разработаны методика и алгоритмы стохастической оптимизации. Оптимальным планируемым режимом работы гидроэлектростанций считается режим, в котором композиция всех функций эффективности имеет минимальное значение, а именно, в котором недополученный экономический эффект и риски нарушения требований равны нулю.

В соответствии с постановкой задачи оптимизации наиболее точным отражением является целевая функция, которая представляет минимизацию максимального значения из всех показателей эффективности. Однако в связи с направленностью диссертационной работы на разработку нового подхода к планированию режимов работы гидроэнергетических систем, а также исследованием эффективности реализации предлагаемого подхода в действующей системе планирования, дальнейшую разработку алгоритмов произведена на основании используемых на практике методов нелинейного программирования, применяемых в действующих методиках долгосрочного планирования ПАО «РусГидро» и АО «СО ЕЭС». В связи с этим целевая функция представлена суммой показателей эффективности.

$$F = \sum R + \mathcal{E} \Rightarrow \min \quad (10)$$

где R – риски нарушения требований, \mathcal{E} – экономический эффект.

Независимыми параметрами в оптимизационной модели являются средние за интервал расчета расходы воды ($Q_{i,j}$), представим их в виде матрицы Y .

$$Y = \begin{bmatrix} Q_{1,1} & Q_{2,1} & \dots & Q_{n,1} \\ Q_{1,2} & Q_{2,2} & \dots & Q_{n,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{1,i} & Q_{2,i} & \dots & Q_{n,k} \end{bmatrix} \quad (11)$$

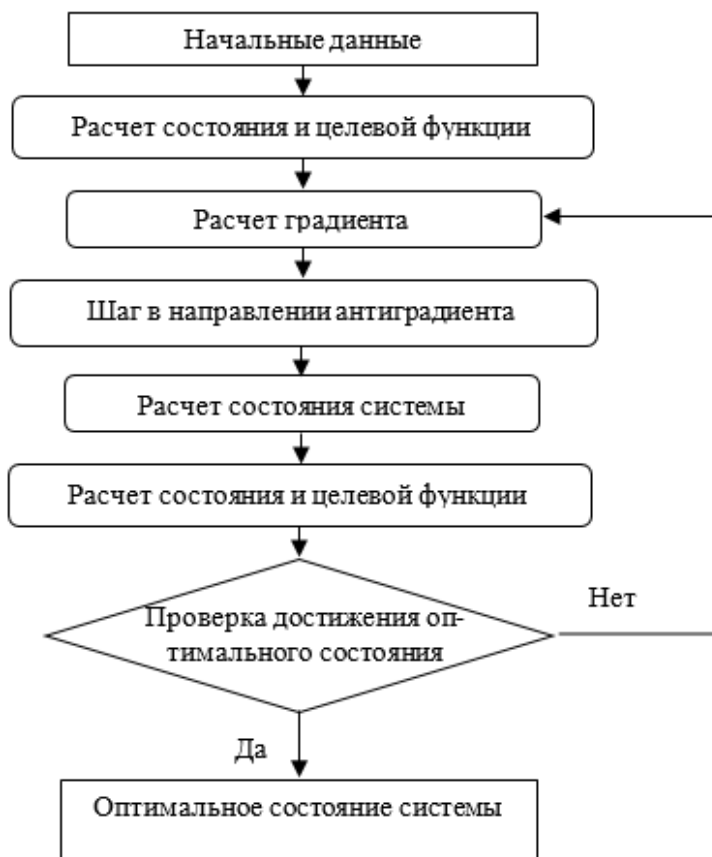
Для более точного ориентирования движения к оптимальному режиму использован модифицированный градиент-вектор, представляющий собой сумму произведений частных производных с соответствующими составляющими целевой функции (10).

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial Y} = R_{Q_{\text{вод}}} \frac{\partial R_{Q_{\text{вод}}}}{\partial Y} + R_{Q_{\text{нав}}} \frac{\partial R_{Q_{\text{нав}}}}{\partial Y} + R_{Q_{\text{эс}}} \frac{\partial R_{Q_{\text{эс}}}}{\partial Y} + \mathcal{E} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial Y}, \quad (12)$$

где $R_{Q_{\text{вод}}}$ – риски функционирования систем водоснабжения, $R_{Q_{\text{нав}}}$ – риски функционирования водного транспорта, $R_{Q_{\text{эс}}}$ – риски функционирования электроэнергетических систем.

Движение к оптимальному режиму в общем виде происходит в соответствии с рекуррентным выражением.

$$Y_{i+1} = Y_i - h \cdot \nabla F \quad (13)$$



Проверка достижения оптимального состояния происходит путем поиска минимального значения в области допустимых значений и выбора наименьшего из локальных экстремумов и граничных точек функции F .

$$\left. \begin{aligned} F_{i+1} - F_i &\leq \varepsilon \\ F'_{i+1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Общий ход вычислений представлен в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 5.

Рисунок 5 - Схема оптимизационного процесса

Блок схема алгоритма расчета состояния системы представлена на рисунке

6.

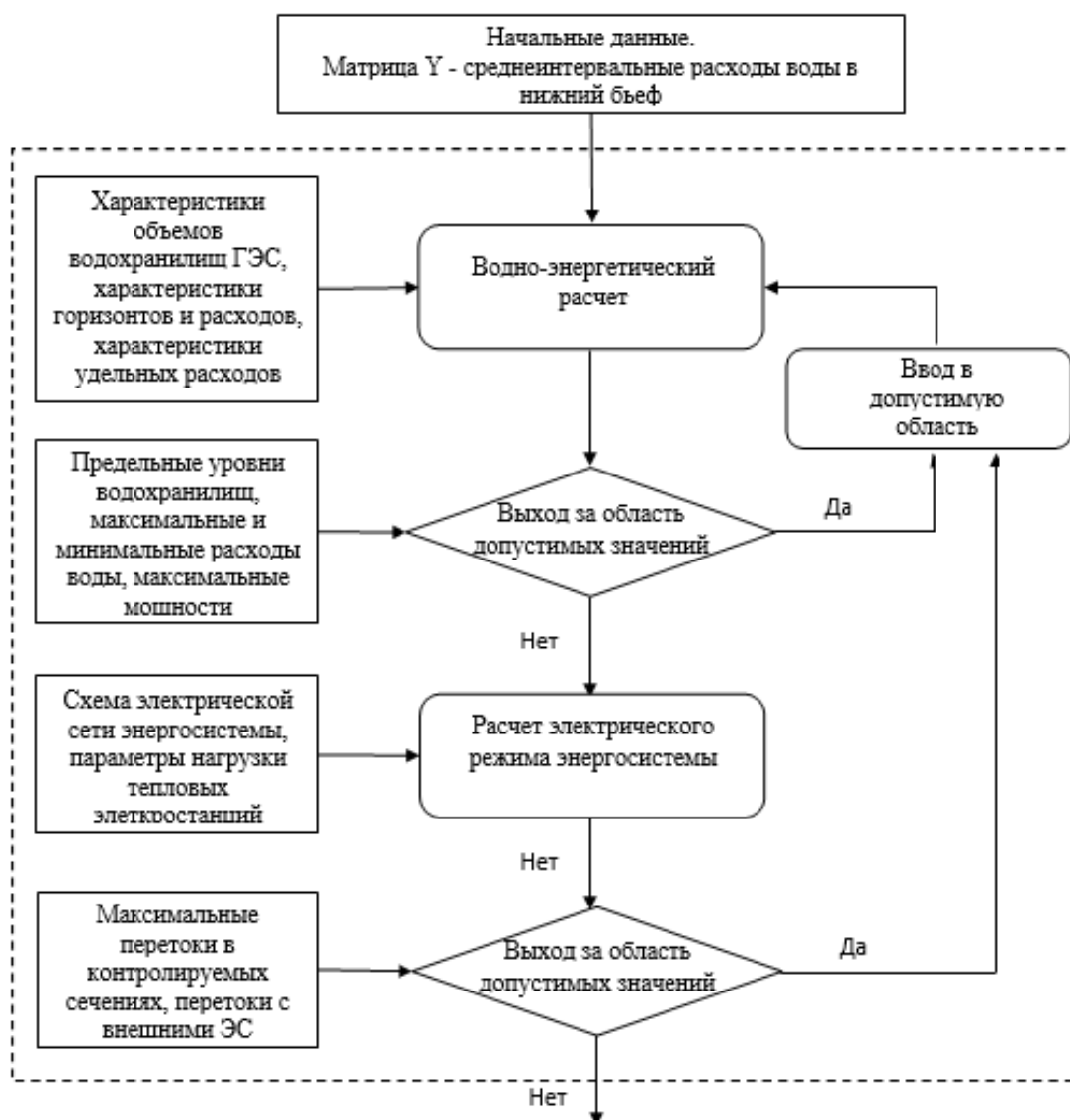


Рисунок 6 - Блок схема алгоритма расчета состояния системы.

В соответствии с выбранной структурой блок-схема включает следующие модули:

- Модуль водно-энергетического расчета, состоящий из 4 методик расчета водно-энергетических показателей режимов работы ГЭС: по заданному расходу, по заданному уровню ВБ, по заданной мощности, по заданной выработке электроэнергии. На базе этого модуля была разработана программа для ЭВМ ПО «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада»;

- Модуль расчета электрического режима энергосистемы, разработанный на базе метода Гаусса для линейных уравнений установившегося режима электрических сетей;

- Модуль ввода в допустимую область, который учитывает два различных типа ограничений: ограничения по водному режиму, ограничения по электрическому режиму энергосистемы.

При разработке модуля расчета электрического режима энергосистемы произведено сравнение результатов расчета линейных уравнений, по методу Гаусса, и нелинейных уравнений, по методу Ньютона. В связи с несущественными отличиями результатов для задач долгосрочного планирования, выбраны линейные уравнения установившегося режима и метод Гаусса.

Ввод в допустимую область реализован в соответствии с методом проекции градиента. В связи с тем, что в качестве вектора независимых параметров выбран вектор расходов воды в нижний бьеф, ввод в допустимую область для ограничений по расходу воды производится методом «срезки». Уровень верхнего бьефа, мощность или электроэнергия является зависимым параметром, поэтому для таких ограничений разработан следующий алгоритм. Рассчитывается объем воды, превышающий над объемом $W(Z_{vb_max})$ или недостаточный до объема $W(Z_{vb_min})$.

$$\left. \begin{aligned} \Delta W &= W(Z_{vb}) - W(Z_{vb_max}) \\ \Delta W &= W(Z_{vb_min}) - W(Z_{vb}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Составляющие выражений (15) типа $W(Z)$ рассчитываются, используя характеристику объемов водохранилищ ГЭС.

Для соблюдения ограничений на интервале k излишний или недостающий объем воды распределяется по предшествующим интервалам в соответствии с вектор-градиентом по следующему выражению:

$$Q_i = Q_i \pm \nabla F'_i \cdot \frac{\Delta W \cdot 10^{-9}}{T} \quad (16)$$

где $\nabla F'_i$ – прирост расхода воды для интервала i .

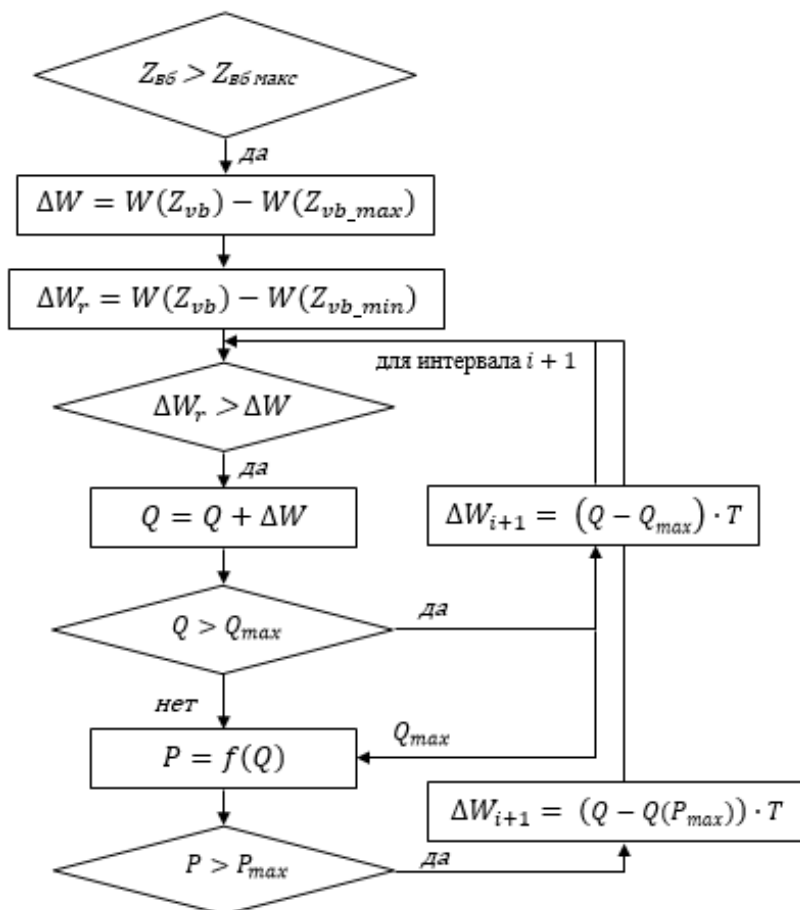
$$\nabla F'_i = \nabla F_i / \sum_{j=1}^k \nabla F_j \quad (17)$$

где ∇F_i – составляющая градиент-вектора для интервала i , $\sum_{j=1}^k \nabla F_j$ – сумма составляющих градиент-вектора для всех предшествующих интервалов.

Дополнительно в процессе распределения излишний или недостающий объем воды по интервалам проверяется на допустимость по остальным условиям. Схема алгоритма ввода в допустимую при нарушении ограничений по уровню верхнего бьефа представлена на рисунке 7.

При превышении предельных значений выработки электроэнергии или мощности ввод в допустимую область происходит по аналогичному алгоритму. При превышении перетока мощности в каком-либо сечении электрической сети

над максимальным значением определяется величина мощности ГЭС, при которой расчетный переток мощности стал равным максимальному. Рассмотрена возможность применения матриц чувствительности для определения связи между перетоками в ветвях модели и мощностями узлов. Изменение перетоков мощности в ветвях выражается через изменения задающих мощностей в узлах для линейных уравнений установившегося режима по выражению (7).



В качестве подтверждения аналитического выражения связи изменения перетоков мощности в ветвях модели электрической сети от изменений задающих мощностей в узлах (7) в главе произведены расчеты режимов электрической схемы, определены отклонения результатов расчета и приращения, рассчитанные на основании матрицы чувствительности.

Рисунок 7 - Схема алгоритма ввода в допустимую область при нарушении ограничений по уровню верхнего бьефа

Из результатов расчета следует, что отклонения зависимых параметров, рассчитанных на основании матрицы чувствительности, точно соответствуют отклонениям, рассчитанным на основании двух результатов расчета решений линейных уравнений установившегося режима.

На основании представленных алгоритмов разработана программа для ЭВМ «Программа расчета оптимальных режимов гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада».

В четвертой главе проведены имитационные расчеты оптимальных долгосрочных режимов на примере Ангаро-Енисейского каскада ГЭС с последующим анализом полученных результатов.

Ангаро-Енисейский каскад ГЭС расположен на р. Ангара и р. Енисей, схема расположения изображена на рисунке 8. В связи с тем, что р. Ангара впадает в р.

Енисей, режимы работы всех ГЭС, расположенных на этих реках, связаны общим гидрологическим режимом.



Рисунок 8 - Схема расположения Ангаро-Енисейского каскада ГЭС

Помимо общности гидрологического режима ГЭС Ангаро-Енисейского каскада связаны электроэнергетическим режимом, функционируя в составе объединенной энергетической системы Сибири, упрощенная структурная схема которой изображена на рисунке 9.

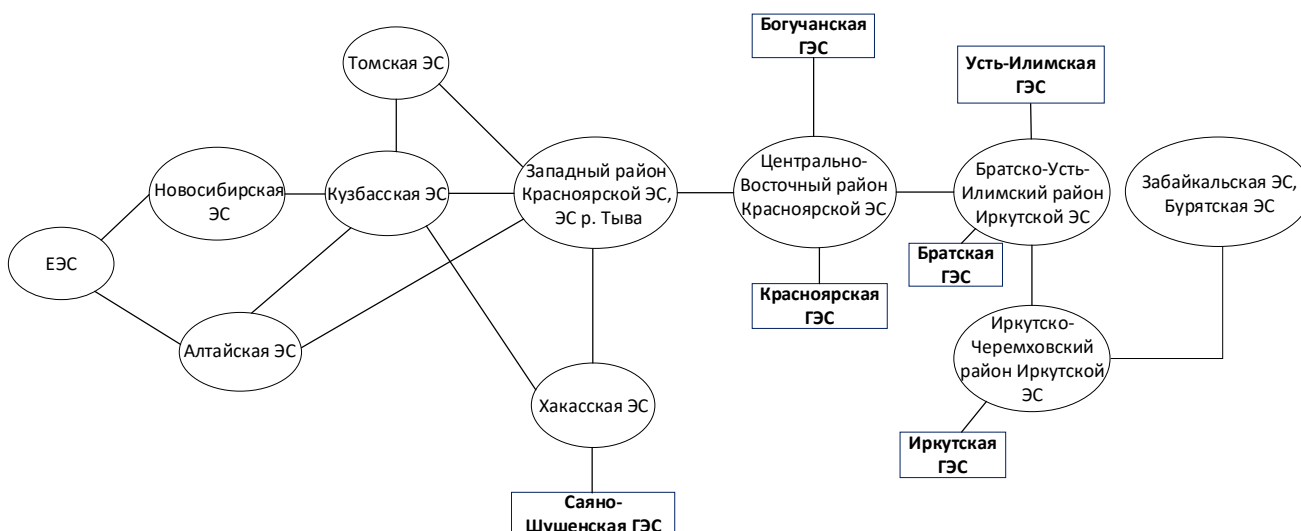


Рисунок 9 - Упрощенная структурная схема электроэнергетической системы Сибири с выделением расположения ГЭС Ангаро-Енисейского каскада

Расчеты были произведены для объемов притоков 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% и 95% обеспеченности. Анализ имитационных расчетов проведен на основании результатов расчетов режимов работы Саяно-Шушенской ГЭС, представленных в виде графиков на рисунке 10.

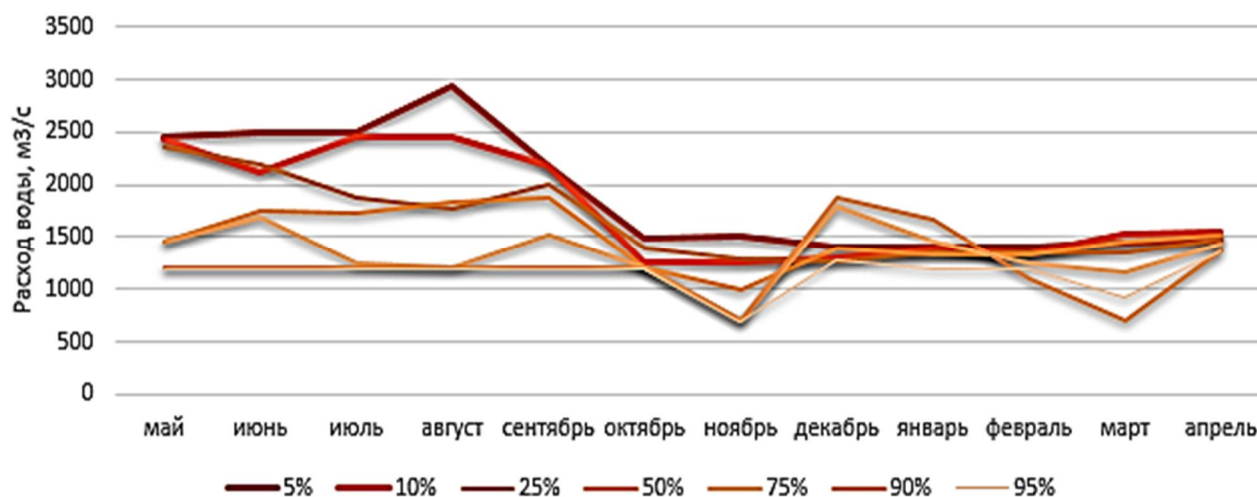


Рисунок 10 – Результаты расчетов режимов работы Саяно-Шушенской ГЭС

В условиях низкой приточности с обеспеченностью 75-95% программа рассчитывает оптимальный режим работы ГЭС, характеризующийся расходами воды близкими к минимальным в навигационный период (с мая по октябрь) для минимизации рисков по требованиям водного транспорта и водоснабжения, а накопленный запас воды в основном расходуется в период с декабря по январь (период максимального потребления в энергосистеме), для снижения рисков возникновения дефицита в энергосистеме. Также можно отметить, что при притоках 95% и 90% обеспеченности в связи с высокими рисками нарушения требований водного транспорта и водоснабжения г. Красноярск необходимо сбрасывать водохранилище Красноярской ГЭС ниже 230 м.

В условиях средней и повышенной приточности 25-50% программа рассчитывает оптимальный режим работы ГЭС, характеризующийся наиболее компромиссными режимами, обеспечивающими минимальные риски нарушения требований в условиях заданной системы ограничений, а также минимальные отклонения от максимальной выработки электроэнергии.

В условиях высокой приточности 5%-10% программа рассчитывает оптимальный режим работы ГЭС, характеризующийся повышенными расходами воды в период с мая по август, для снижения рисков превышения перетоков в сечении «Выдача мощности СШГЭС», «Выдача мощности БоГЭС», «Тайшет, Ангара – Запад» и «Красноярская ГЭС – Назаровская ГРЭС» в последующие периоды, в дополнение к этому в процессе расчета были добавлены холостые сбросы в период с июля по август, и в период с сентября по апрель равномерным расходом для снижения рисков возникновения избытка в энергосистеме.

Полученные результаты имитационных расчетов режимов работы Ангаро-Енисейского каскада ГЭС доказывают адекватность предлагаемых методик и алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основной результат работы заключается в разработке методики и алгоритмов стохастической оптимизации для планирования долгосрочных водно-энергетических режимов гидроэнергетических систем, обеспечивающей максимальный эффект от использования электроэнергии в энергетической системе и минимальные риски нарушения требований остальных водопользователей.

В работе решены следующие задачи:

Разработана методика расчета показателей эффективности, учитывающая исходные параметры вероятностной природы. Показатели эффективности выражают риски нарушения требований основных категорий водопользователей и других зависящих от режимов работы гидроэнергетических систем технологических процессов.

Разработана методика и алгоритмы стохастической оптимизации долгосрочных режимов работы гидроэнергетических систем, функционирующих в составе энергетических систем. Основное отличие методики от существующих в том, что в дополнение к детерминированным показателям эффективности режимов работы гидроэнергетических систем и энергосистем применяются стохастические показатели, отражающие сущность непредсказуемости притока воды в водохранилища ГЭС.

Разработан программный комплекс «Программа расчета оптимальных режимов гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019661972 от 12.09.2019 г.)

Разработан программный комплекс «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618953 от 11.08.2017 г.) В настоящее время этот программный продукт используется в Филиале АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири в качестве основного средства расчета водно-энергетических режимов гидроэлектростанций.

В качестве направления развития предлагаемых решений может быть разработка алгоритмов стохастической оптимизации на основе эвристических методов, целевой функцией в которых будет являться минимизация максимальных значений отклонений показателей эффективности от идеальных значений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, из перечня рекомендуемых ВАК:

1. Труфакин, С.С. Разработка программного обеспечения «Водно-энергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» / С.С. Труфакин, Е.А.

Совбан, А.Г. Русина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2016. - №9-10. - С. 105-111.

2. **Труфакин, С.С.** Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС Ангаро-Енисейского каскада / С.С. Труфакин, В.И. Пантелеев, Е.А. Совбан, А.Г. Русина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2018. - №2(58). - С. 144-151.

3. **Труфакин, С.С.** Разработка методики рационального использования водных ресурсов Ангаро-Енисейского каскада гидроэлектростанций / С.С. Труфакин, В.И. Пантелеев // Вестник ИрГТУ. - 2019. - №6. - С. 1165-1174.

В изданиях, индексируемых в Scopus:

4. **Trufakin, S.S.** Stochastic optimization of Modes of Hydroelectric Power Plants / S.S. Trufakin, V.I. Panteleev, G.A. Pilugin // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). - Sochi: IEEE, 2019. - P. 1-5.

5. **Trufakin S.S.** The Features of Mathematical Optimization Models of Modes Hydro-Power Stations / E.A. Sovban, T.A. Filippova, V.I. Panteleev, S.S. Trufakin // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). - Novosibirsk: IEEE, 2018. - P. 428-432.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. Свидетельство № 2019661972 Российская Федерация. Программа расчета оптимальных режимов гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского каскада: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / **С.С. Труфакин**, В.И. Пантелеев; заявитель и правообладатель Федер. Гос. Автон. Образоват. Учреждение высш. Обр. «Сибирский федеральный университет» - № 2019661972; заявл. 30.08.2019; зарегистрир. 12.09.2019. – 1с.

В других изданиях:

7. **Труфакин, С.С.** Разработка методики по планированию оптимальных краткосрочных режимов гидроэлектростанций в ОЭС Сибири / С.С. Труфакин // 3-ая междунар. науч.-техн. конф. "Электроэнергетика глазами молодежи - 2012". - Екатеринбург: УРФУ, 2012. – С. 525-528.

8. **Труфакин, С.С.** Задачи оптимального использования гидроэлектростанций в ЭЭС / С.С. Труфакин, А.Г. Русина, Е.А. Совбан // 3-ая междунар. науч.-техн. конф. "Электроэнергетика глазами молодежи - 2012". - Екатеринбург: УРФУ, 2012. – С. 519-524.

9. **Труфакин, С.С.** Регулирование напряжения в распределительных сетях Таджикистана с малыми ГЭС / С.С. Труфакин, С.Т. Исмоилов // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК». Под редакцией А.В. Павлова. - Саратов: ООО ПКФ "Буква", 2013. - С. 113-117.

10. **Труфакин, С.С.** Разработка программного обеспечения «Водноэнергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» / С.С. Труфакин, Е.А. Совбан, А.Г. Русина // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». - Казань: КГЭУ, 2016. - С. 405-408.

11. **Труфакин, С.С.** Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС Ангаро-Енисейского каскада / С.С. Труфакин, В.И. Пантелеев, Е.А. Совбан, Т.С. Филиппова // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». - Самара: СамГТУ, 2017. - С. 173-176.

12. **Труфакин, С.С.** Разработка принципа управления электроэнергетическим режимом объединенной энергосистемы Сибири со значительной долей гидроэлектростанций / Е.А. Совбан, Т.А. Филиппова, С.С. Труфакин // Электроэнергетика глазами молодежи Сборник докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции. - Казань: КГУ, 2018. - С. 186-189.

13. **Труфакин, С.С.** Учет ограничений по электрической сети при планировании долгосрочных режимов гидроэлектростанций / С.С. Труфакин, В.И. Пантелеев // Борисовские чтения: Материалы II Всероссийская научно-технической конференции памяти профессора Борисова В.Н. - Красноярск: СФУ, 2019. - С. 87-90.