

На правах рукописи



СУЛТОНОВ Шерхон Муртазокулович

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА)**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Секретарев Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Тягунов Михаил Георгиевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии», г. Москва

Дегтярев Владимир Владимирович
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», заведующий кафедрой «Гидротехническое строительство, безопасность и экология», проректор по научной работе, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), г. Иркутск

Защита состоится «13» октября 2016 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=15683

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Принципы, методы и реализация оптимального управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) образует сложный комплекс задач, структура которых определяется особенностями функционирования ЭЭС, спецификой генерации энергии в ней и характером ее потребления. Это приводит к отсутствию унифицированных решений в назначении оптимальных режимов работы ЭЭС и требует разработки индивидуальных подходов к управлению.

Электроэнергетическая система Таджикистана, состоящая в основном из гидроэлектростанций (ГЭС), имеет существенные особенности, которые должны учитываться при управлении режимами работы электростанций в энергосистеме.

Почти 96 % установленной мощности системы, приходится на долю гидроэлектростанций, которые производят около 98 % электроэнергии всей стране. В Таджикистане работают в зимнем периоде (ноябрь – февраль) две теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) суммарной мощностью 298 МВт, которые снабжают жителей города Душанбе горячей водой и электроэнергией.

Другой важной особенностью ЭЭС Таджикистана является то, что почти вся мощность ГЭС сосредоточена на реке Вахш, что приводит при назначении оптимальных режимов работы ГЭС учитывать их связанность по стоку.

Следующая характерная черта заключается в том, что мощность Нурекской ГЭС, обладающая водохранилищем годового (сезонного) регулирования, составляет 80 % мощности всего Вахшского каскада. Такое доминирование приводит к тому, что расходы воды, получаемые другими ГЭС каскада, имеющих водохранилища, как правило, суточного регулирования, определяются, главным образом, транзитным стоком Нурекской ГЭС. Естественно, что при этом регулировочные способности этих ГЭС в ЭЭС чрезвычайно малы.

Таким образом, в настоящее время Таджикистан испытывает серьезные трудности, связанные с устойчивым дефицитом электроэнергии, который в зимний период составляет 2 – 4 млрд. кВт·ч.

Итак, основными причинами дефицита энергии в Республике Таджикистан (РТ) являются следующие:

- Ограниченность стока воды в реках в зимнем (меженном) периоде. Как было отмечено, из всех ГЭС только Нурекская ГЭС имеет водохранилище годового (сезонного) регулирования ёмкостью $10,5 \text{ км}^3$ воды, а все остальные - или суточное регулирование или вообще без возможности регулирования. Запасенная энергия не может обеспечить страну в зимнем периоде.

- Изолированная работа энергосистемы. С 2009 года энергосистема Таджикистана работает изолировано, что приводит к невозможности импорта электроэнергии из соседних стран в зимний период. В летний же период в стране имеется избыток электроэнергии, который не может экспортироваться в соседние страны. Поэтому огромное количество воды сбрасывается в холостую. Потеря энергии в летний период составляет от 3 до 7,5 млрд. кВт·ч. в зависимости от водности года.

- Рост потребления электрической энергии населением в зимнем отопительном периоде.

- Недостаточное функционирование ТЭЦ в зимнем периоде. Это связано со снижением поставок природного газа и нефтепродуктов в Республику Таджикистан из соседних стран и постоянное увеличение стоимости энергоносителей.

- Ограниченность внутренних финансовых возможностей страны, высокая капиталоемкость модернизации и строительства крупных ГЭС, разработки и добычи природного газа, угля, нефти, производства альтернативных видов энергии, строительства новых ЛЭП, в том числе для осуществления экспорта электроэнергии.

Таким образом, *актуальность* данной работы определяется проведением исследований и поиску решений снижения существующего дефицита электроэнергии в Таджикистане на основе расчетов оптимальных режимов работы энергосистемы в долгосрочном и краткосрочном временном разрезе.

Разработке теории, методов и принципов управления режимами ЭЭС всегда уделялось большое внимание. Значительный вклад в развитие теории, исследования и разработку методов, алгоритмов оптимизации режимов электроэнергетических систем внесли коллективы ВНИИЭ, ИСЭМ СО РАН, МЭИ, НГТУ и ряд других организаций. Различные способы, методы и средства управления режимами работы электроэнергетических систем и гидроэлектростанций рассмотрены в работах В.М. Горнштейна, Д.А. Арзамасцева, В.А. Веникова, В.Г. Журавлева, Л.С. Беляева, Н.И. Воропая, В.И. Обрезкова, Ю.А. Секретарева, М.Г. Тягунова, И.М. Марковича, Т.А. Филипповой, Е.В. Цветкова, Х.Ф. Фазылова и многих других. Исследования в области совершенствования контроля и создания эффективных систем управления режимами работы ЭЭС и гидроэлектростанций продолжаются и в настоящее время.

В Таджикистане вопросам экономической эффективности использования гидроэнергоресурсов и гидроэлектростанций были посвящены работы А.Д. Ахроровой, М.А. Бурхановой, Х.Д. Мустафаева, Б.С. Сироджева, С.Р. Расулова, Х.А. Одинаева, Т. Валамат-Заде, Г.Н. Петрова, А.Х. Авезова, С.Т. Наврузова и др.

Однако следует признать, что проблеме оптимального управления режимами гидроэлектростанций в энергосистеме Таджикистане уделялось недостаточно внимания. Данная работа направлена именно на этот аспект научных исследований.

Цель диссертационной работы заключается в адаптации методов долгосрочной и краткосрочной оптимизации к режимам работы энергосистемы Таджикистана, содержащей высокую долю гидроэлектростанций и совершенствовании методик расчета оптимальных режимов.

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

1. Анализ существующих методов оптимизации режимов гидротепловых энергосистем.
2. Оптимизация режима работы водохранилищ ГЭС энергосистемы за счет эффективного перераспределения стока внутри года.

3. Обоснование углубленной сработки водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки на основе поиска компромиссного решения.
4. Модернизированная процедура метода относительных приростов, позволяющая решать вопрос минимизации транзитного стока Нурекской ГЭС, проходящего по всем гидростанциям каскада, расположенным ниже.
5. Оценка энергетического эффекта за счет снижения дефицита электроэнергии при долгосрочной и краткосрочной оптимизации ЭЭС Таджикистана.
6. Разработка программы краткосрочной оптимизации режимов ГЭС энергосистемы РТ, для анализа суточных режимов ЭЭС и расчета дополнительной выработки электроэнергии.

Объектом исследования диссертационной работы является электроэнергетическая система с большой долей гидравлической мощности (на примере Республики Таджикистан).

Предмет исследования - совершенствование оптимального управления режимами гидроэлектростанций в энергосистеме с целью снижения в ней дефицита электроэнергии.

Методы исследований. В работе используются методы водно-энергетических расчетов регулирования ГЭС, оптимизационные методы нелинейного программирования с учетом различных ограничений характерных особенностей работы гидроэнергетических комплексов.

Научная новизна работы:

1. Учитывая специфику работы Вахшского каскада в республике, адаптированы для этих условий оптимизационные алгоритмы и усовершенствованы методики расчетов.
2. В рамках долгосрочной оптимизации предложена методика оптимального перераспределения стока между сезонами на основе ограниченного перебора комбинаций режимов ГЭС.
3. Разработана методика дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки путем поиска компромиссного решения с учетом дополнительных ограничений по гидрологии и техническим характеристикам плотины.
4. Краткосрочная оптимизация режимов ГЭС осуществлена на основе модернизированной процедуры метода относительных приростов, целью которой является минимизация транзитного стока на всех гидростанциях каскада

Практическая значимость и реализация результатов. Проведенные исследования показывают, что при использовании оптимизационных схем управления гидростанциями возможно снизить дефицит энергии в республике Таджикистан на 15 – 17 %.

Результаты диссертационной работы будут использованы в ОАХК «Барки Точик», для назначения оптимальных режимов ЭЭС Таджикистана, внедрены в учебный процесс на факультете энергетики НГТУ, на кафедры «Электрические станции» Таджикского технического Университета имени М.С. Осими, а также в институте энергетики Таджикистана.

Достоверность и обоснованность. Достоверность полученных результатов оценивалась на основе сравнения фактических режимов работы ЭЭС Таджикистана в годовом, сезонном и суточном разрезах с режимами, рассчитанными на основе предложенных оптимизационных алгоритмов. Эффект от оптимизации оценивался в виде дополнительной выработки электроэнергии, которая позволяет снизить дефицит электроэнергии в Таджикистане.

Личный вклад автора.

Соискателем проанализировано текущее состояние энергосистемы Республики Таджикистан, из которого следует, что дефицит электроэнергии в зимнее время происходит из-за высокой степени неопределенности в режимах работы ГЭС Вахшского каскада. Кроме этого сам каскад ГЭС является уникальным с точки зрения структуры мощностей ГЭС, т.к. практически только Нурекская ГЭС обладает значительными регулировочными способностями.

Обзор существующих оптимизационных методов потребовал от соискателя адаптировать ряд этих методов к специфическим условиям работы Вахшского каскада, как в долгосрочном так и краткосрочном разрезах.

В рамках долгосрочной оптимизации было предложено решение двух задач:

- перераспределения стока между сезонами на основе ограниченного перебора вариантов режима работы каскада;
- обоснование углубленной сработки водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки на основе поиска компромиссного решения.

Для краткосрочной оптимизации режимов соискателем предложена модернизированная процедура метода относительных приростов, позволяющие решать вопрос минимизации транзитного стока Нурекской ГЭС, проходящего по всем гидроэлектростанциям каскада, расположенным ниже.

Также соискателем приведены расчеты эффектов от долгосрочной и краткосрочной оптимизации режимов ЭЭС Республики Таджикистан. Основной эффект рассчитан как выработка дополнительной энергии, которая позволяет снизить дефицит электроэнергии в годовом разрезе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с паспортом специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» представленная диссертационная работа направлена на адаптацию методов долгосрочной и краткосрочной оптимизации к режимам работы энергосистемы Таджикистана, содержащей высокую долю гидроэлектростанций и совершенствовании методик расчета оптимальных режимов.

Диссертация соответствует п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» и п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показана необходимость оптимального перераспределения стока между сезонами в работе Вахшского каскада, по методике основанной на ограниченном переборе комбинаций режимов всех входящих в него ГЭС.

2. Доказана возможность углубленной сработки водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки на основе поиска компромиссного решения между ограничениями по гидрологии и техническим характеристикам плотины.
3. Разработанная модернизированная процедура метода относительных приростов для минимизации транзитного стока ГЭС каскада в суточном разрезе.
4. Проведены оценки энергетического эффекта от долгосрочной и краткосрочной оптимизации, позволяющее снизить дефицит энергии в Таджикистане в годовом разрезе.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее части докладывались и обсуждались на I, II и III Всероссийской научно-практической конференции «Гидроэлектростанции в XXI веке» (г. Саяногорск, 2014, 2015, 2016 г.); на I международном конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (НГТУ, г. Новосибирск, 2014 г.); на VII международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (НГТУ, г. Новосибирск, 2015 г.); на XXI международной научной конференции «Современные техника и технологии» (ТПУ, г. Томск, 2015 г.); на XI международной научно – технической конференции «Энергия-2016» (ИГЭУ, г. Иваново, 2016 г.); на XI Международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST-2016); на Днях науки НГТУ в 2015 г.; на научных семинарах кафедры «Систем электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в реферируемом зарубежном издании, 9 – статей в материалах международных и всероссийских научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и 4 приложений. Общий объем работы составляет 163 страницы, в том числе 129 страниц основного текста, включая 36 рисунка, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проанализировано текущее состояние энергосистемы РТ, представлен обзор существующих методов оптимизации режимов работы электростанций и энергосистем, показаны их недостатки и достоинства, сформулирована математическая постановка задачи в рамках выбранного метода.

Как уже отмечалось, характерной чертой данной электроэнергетической системы является то, что из 5500 МВт установленной мощности электрических станций 96 % приходится на долю гидроэлектростанций, которые производят около 98 % электроэнергии по всей стране. Другой чрезвычайно специфической особенностью системы является то, что почти 97 % мощностей всех ГЭС

находятся на одной реке - Вахш и на них вырабатывается около 94 % электроэнергии страны.

Из вышесказанного следует, что ЭЭС Республики Таджикистан в настоящее время испытывает серьезные трудности с электроснабжением, вызванный, главным образом, спецификой выработки электроэнергии на ГЭС. Это специфика вызвана сезонностью выработки электроэнергии, неравномерностью внутригодового распределения и отсутствием достаточной резервной мощности на тепловых электростанциях. Существующий дефицит электроэнергии в Таджикистане требует определенных исследований в области эффективного использования энергоресурсов, назначения оптимальных режимов ГЭС и энергосистемы для долгосрочного и краткосрочного периода. Разработка современных научных подходов и применение различных математических методов, специальных программ позволят увеличить выработку электроэнергии и тем самым снизить зимний дефицит в стране.

Очевидно, что снижение дефицита энергии за счет перераспределения энергии внутри года, оптимизация режимов сработки и заполнения водохранилищ, оптимизация суточных режимов работы ЭЭС является одним из важнейших путей решения проблемы дефицита электроэнергии в Республике Таджикистан.

Обзор методов оптимизации показал, что при решении оптимизационных задач, в области энергетики в основном применяются методы нелинейного программирования. Среди наиболее распространенных можно выделить метод неопределенных множителей Лагранжа, различные модификации градиентного метода, метод Ньютона второго порядка, метод динамического программирования и др. Метод равенства относительных приростов, созданный на базе метода неопределенных множителей Лагранжа, получил широкое применение при решении задач оптимизации в электроэнергетике. Метод равенства относительных приростов применяют при нахождении оптимального распределения нагрузки между тепловыми станциями, между ГЭС и ТЭС, а также между агрегатами на электростанциях при внутростанционной оптимизации.

Обзор публикаций по оптимизации режимов электростанций и энергосистем показывает, что почти во всех работах рассматривались оптимальное распределение активной мощности между ТЭС и ГЭС или между ТЭС и между агрегатами станций, с использованием различных методов оптимизации. В этих работах не проводились исследования и разработки методик которые позволяли бы оптимизировать режимов энергосистем с большой долей ГЭС, т.е. позволяющие учитывать специфические особенности энергосистемы Таджикистана.

Во втором разделе уделено внимание двум задачам долгосрочной оптимизации режимов работы ГЭС Вахшского каскада.

Первая задача заключается в получении дополнительной выработки электроэнергии на основе оптимального распределения стоков внутри годов различной водности. Проанализированы ограничения, накладываемые на расходы воды, проходящие через гидростанции в соответствии с требованиями водохозяйственного комплекса и межгосударственных соглашений.

Необходимо отметить, что из пяти рассматриваемых ГЭС с водохранилищами только водохранилище Нурекской ГЭС имеет способность годового (сезонного) регулирования стока, а остальные ГЭС, расположенные ниже по течению, обеспечивают лишь суточное регулирование. Оптимальное распределение стока в данной работе рассматривается для ГЭС Вахшского каскада (кроме Центральной и Перепадной ГЭС), которые имеют водохранилище.

Требуется найти режим сработки и наполнения водохранилищ ГЭС, максимизирующий суммарную выработку энергии каскадов ГЭС за расчетный период.

В энергосистеме работает n гидростанций ($j=1, 2, \dots, n$). Каждая ГЭС за период Δt_i может вырабатывать определенное количество электроэнергии.

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ГЭСij}(x) \cdot \Delta t_i \longrightarrow \max, \quad (1)$$

где $P_{ГЭСij}$ – мощность j – ой ($j=1, 2, \dots, n$) ГЭС в i – ом интервале ($i=1, 2, \dots, k$), МВт, Δt_i – длительность i – го расчетного интервала, ч, n – число ГЭС, k – интервал времени.

Мощность каждой станции в рассматриваемом интервале

$$P_{ГЭСij} = 9,81 \cdot Q_{ij} \cdot H_{срj} \cdot \eta_{ij}, \quad (2)$$

где $H_{срj}$ – средний за расчетный период напор, Q_{ij} – расход воды через турбины j – ой ГЭС, η_{ij} – к.п.д. j – ой ГЭС.

Уравнения ограничений для каждой ГЭС:

По уровням водохранилища.

Для каждой ГЭС задается максимальное и минимальное значение уровня верхнего бьефа.

$$Z_{ВБminij} \leq Z_{ВБij} \leq Z_{ВБmaxij}, \quad (3)$$

где $Z_{ВБj}$ – уровень верхнего бьефа ГЭС (м), определяемый по характеристикам верхнего бьефа каждой ГЭС ($Z_{ВБj} = f(V_{ВБj})$).

По мощности каждой ГЭС

$$P_{minij} \leq P_{ГЭСij} \leq P_{maxij}, \quad (4)$$

где $P_{ГЭСij}$ – текущая мощность j – ой ГЭС и её минимальная и максимальная мощности.

По расходу воды для каждой ГЭС

$$Q_{minij} \leq Q_{ij} \leq Q_{maxij}, \quad (5)$$

где Q_{ij} – расход воды через турбину j – ой ГЭС.

Для ГЭС, расположенных ниже Нурекской ГЭС, рассматривается два режима.

Первый режим

На гидростанциях производится сработка собственных водохранилищ.

В этом случае суммарный расход воды через ГЭС состоит из двух составляющих – из транзитного расхода от Нурекской ГЭС, работающей по заданному графику сработки-заполнения и расхода воды из собственного водохранилища Q_{Vj} :

$$Q_j^V = Q_{j-1} + Q_{Vj} - \Delta Q_{(j-1)-j}, \quad (6)$$

где Q_j^V – расход j – ой ГЭС ($\text{м}^3/\text{с}$), $\Delta Q_{(j-1)-j}$ – расходы на орошения (водозаборы) между j – ой и $j+1$ ГЭС, $\text{м}^3/\text{с}$.

Расход воды при сработки водохранилища j – ой ГЭС, соответствующий полезному объему V_j определяется по формуле:

$$Q_{Vj} = \frac{V_j}{t_{\text{ср.аб}}}, \quad (7)$$

где V_j – полезный объем водохранилища j – ой ГЭС, м^3 , $t_{\text{ср.аб}}$ – период сработки водохранилища j – ой ГЭС, сек.

Второй режим

Нижерасположенные гидростанции работают на транзитном стоке от вышерасположенных, т.е. на Q_{j-1} . При этом их водохранилища остаются заполненным до НПУ, что позволяет им работать с максимальными напорами.

$$Q_j^T = Q_{j-1} - \Delta Q_{(j-1)-j}, \quad (8)$$

Схема возможных комбинации режимов ГЭС каскада Вахш, с учетом всех ограничений и водозаборов показано на рисунке 1.

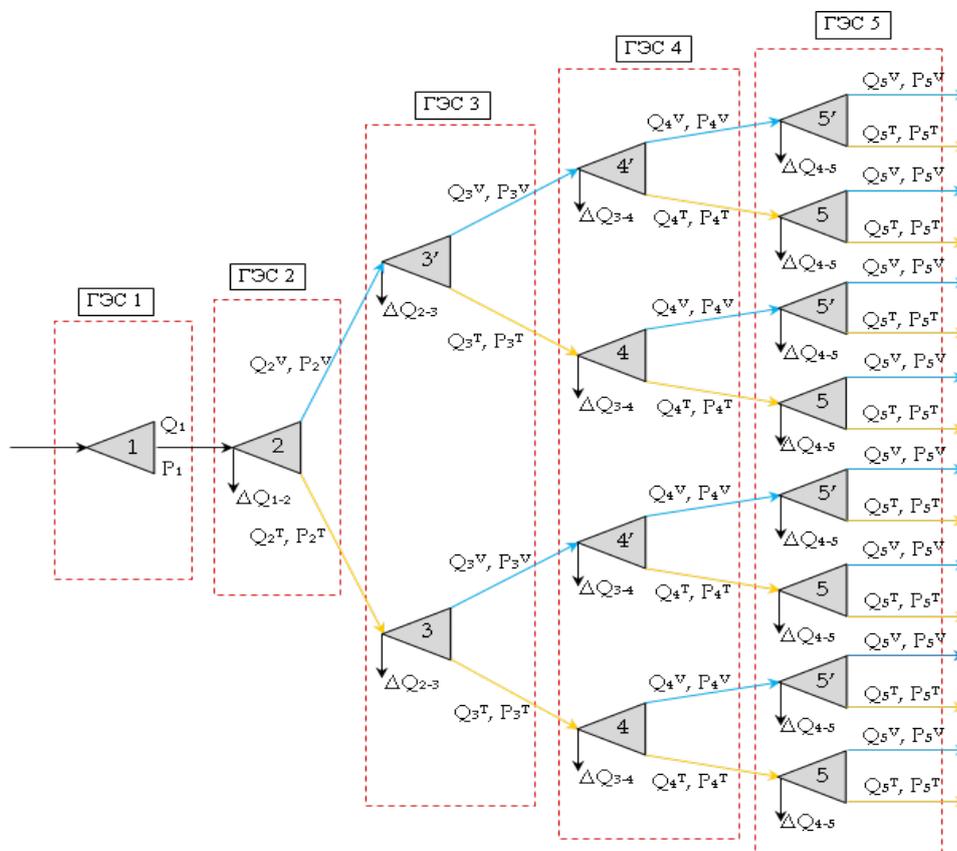


Рисунок 1 – Комбинаторная модель расчета работы каскада ГЭС на реке Вахш в различных режимах

Рассмотрим принципиальные особенности работы данной модели.

При работе Нурекской ГЭС (назовем ее ГЭС 1) по графику сработки-заполнения, ее расход равен Q_1 , что соответствует мощности P_1 .

Расход Нурекской ГЭС является транзитным для нижележащей Байпазинской (обозначим ее ГЭС 2).

При этом ГЭС – 2 может работать в двух режимах:

Первый – использовать расход Q_1 плюс дополнительный расход из собственного водохранилища Q_{V2} , рассчитанным по (7). В этом режиме суммарный расход ГЭС-2 Q_2^V определяется по (6), выдаваемая мощность P_2^V определяется по (2). При этом будут учтены водозаборы воды между ГЭС-1 и ГЭС-2 (ΔQ_{1-2}).

Второй – работать на транзитном стоке, то есть расходовать приток Q_1 , с учетом водозабора ΔQ_{1-2} . В этом режиме расход ГЭС-2 Q_2^T – определяется по (8). При этом выдаваемая мощность ГЭС-2, будет равна мощности на транзитном стоке, т.е. P_2^T ;

Таким же образом рассчитывается режим работы всех остальных станций в каскаде с учетом ограничений и расходов на орошения.

На основании проведенных расчетов была рассчитана дополнительная выработка, которую можно получить после оптимального перераспределения стока между гидростанциями. В качестве отправных точек для расчетов были выбраны следующие:

Режим работы Нурекской ГЭС осуществляется в рамках сезонного регулирования стока с использованием всего полезного объема водохранилища. Все остальные станции каскада работают на транзитном стоке Нурекской ГЭС при полностью заполненных до НПУ собственных водохранилищах. Это условие позволяет поддерживать на нижерасположенных станциях максимальный напор, что соответствует максимальной выработке на них электроэнергии.

При этом запасенная энергия в водохранилищах будет расходоваться в период межени, когда приток воды Нурекской ГЭС и уровень верхнего бьефа минимален. График выдачи мощности Вахшского каскада (кроме Нурекской ГЭС) при работе на транзитном стоке с учетом ирригационных ограничений по заборам показан на рисунке 2.

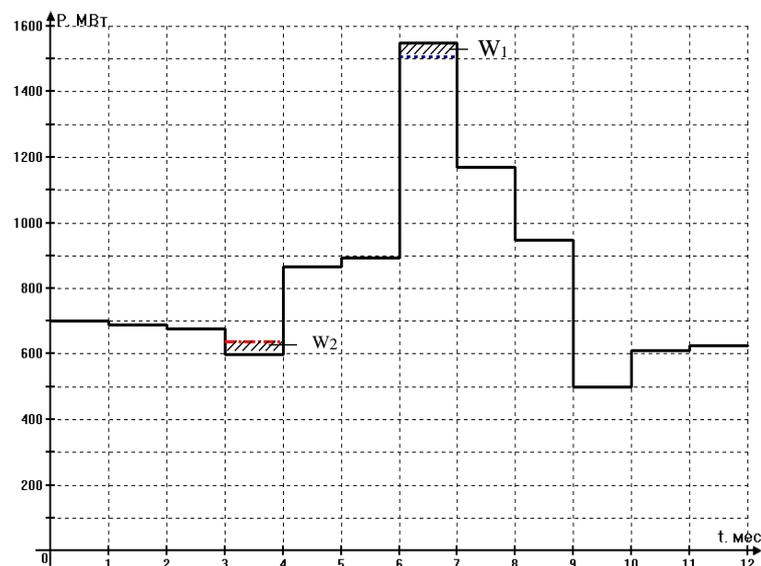


Рисунок 2 – График выдачи мощности каскада

Площадка W_1 является дополнительной энергией, запасенной в нижерасположенных водохранилищах ГЭС. Эту энергию можно использовать во время межени путем дополнительной сработки водохранилищ. Предполагаем, что энергия сработки W_2 равно энергии заполнения W_1 , т.е.

$$W_1 = W_2 = W_{зан} \quad (9)$$

Таким образом, путем перераспределения стока внутри года между гидростанциями, можно увеличить выработку электроэнергии в зимнем периоде. Дополнительная электроэнергия запасенная в водохранилищах $W_{зан}$ позволяет снизить зимний дефицит электроэнергии, на величину от 2 до 4 % в зависимости от водности года.

Вторая задача связана с усовершенствованием методики сработки водохранилища Нурекской ГЭС для получения дополнительной выработки электроэнергии в зимний период. Эта методика разработана на основе компромиссного решения по режиму сработки-заполнения водохранилища.

Выработку электроэнергии на ГЭС можно представить в виде двух составляющих. Первая – выработка электроэнергии, которая зависит от полезного объема сработки водохранилища $V_{пол}$. Эта составляющая $\mathcal{E}_{ВДХ}$ растет с увеличением глубины сработки $h_{ср}$. Вторая составляющая зависит от транзитного стока реки, используемого гидростанцией. Чем больше глубина сработки, тем ниже напор, при котором используется транзитный сток, и эта составляющая бытового стока $\mathcal{E}_{быт}$ падает. Суммарная выработка электроэнергии равна

$$\mathcal{E}_{ГЭС} = \mathcal{E}_{ВДХ} + \mathcal{E}_{быт} = (9,81Q_{ВДХ}H\eta + 9,81Q_{быт}H\eta) \cdot T_{срб} \quad (10)$$

Характеристика выработки электроэнергии $\mathcal{E}_{ГЭС}(V_{пол})$ при сработке водохранилища имеет максимум, и эта глубина сработки называется оптимальной т.е. $h_{опт}$. Это объясняется тем, что дальнейшее углубление сработки водохранилища, хотя и увеличивает его полезный объем и соответственно регулируемый расход, используемый ГЭС, но при этом происходит такое значительное снижение напора, что полная энергия, вырабатываемая на ГЭС, начинает уменьшаться.

Проведенные расчеты по сработке Нурекского водохранилища показали, что энергия не уменьшается даже при глубине сработки ниже, чем на 75 м относительно проектной отметки.

Таким образом, данная методика находит свое применение для расчета оптимальной глубины сработки водохранилищ для низко и средненапорных ГЭС, для которых снижение напора является, как мы уже указывали выше, определяющим. Для высоконапорных ГЭС, таких как Нурекская, Саяно-Шушенская и др. характер изменения выработки в зависимости от глубины сработки водохранилища, не выполняется.

В диссертации была предложена методика дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС на основании поиска компромиссного решения с учетом дополнительных ограничений по гидрологии и техническим характеристикам плотины.

Суть компромисса заключается в следующем:

1. Любая дополнительная сработка водохранилища обязательно должна быть проверена по условию его заполнения. Это дает уверенность в том, что полученная дополнительная выработка за счет сработки водохранилища ниже проектной отметки в зимнюю межень будет обязательно скомпенсирована во время паводка, причем в самых неблагоприятных по водности условиях, а именно, в маловодном году расчетной обеспеченности.

2. Обязательно учитываются технические ограничения по отметке забора воды подводящих водоводов к агрегатам ГЭС, т.е конструкция плотины не меняется.

При сработке водохранилища ниже УМО на каждый метр, выработка электроэнергии увеличивается на $\Delta \mathcal{E}$. В таблице 1, показано зависимость дополнительной энергии в зависимости от глубины сработки ниже УМО.

Таблица 1 – Зависимость выработки электроэнергии от глубины сработки водохранилища

Отметка	h_{cp} , от УМО	$\mathcal{E}_{быт}$	$\mathcal{E}_{ВДХ}$	$\mathcal{E}_{ГЭС}$	$\Delta \mathcal{E}_{ГЭС}$
м	м	млн. кВт.ч			
857	0	2294,575	2078,470	4373,046	0,000
856	-1	2291,352	2087,244	4378,596	40,500
855	-2	2288,128	2119,338	4407,467	46,050
854	-3	2284,766	2145,373	4430,140	74,921
853	-4	2281,589	2183,142	4464,732	97,594
852	-5	2278,486	2197,614	4476,101	132,186
851	-6	2275,420	2235,299	4510,720	143,555
850	-7	2294,575	2078,470	4373,046	178,174

Расчеты показали, что при сработке водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки УМО на 7 метра, водохранилище заполняется до НПУ в период паводка.

В таблице 2 показаны эффекты от дополнительной сработки водохранилища ниже проектной отметки УМО.

Таблица 2 – Эффект от дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС

h_i от УМО, м	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
$\Delta \mathcal{E}_{ГЭС} \cdot 10^6$, кВт·ч	40,500	46,050	74,921	97,594	132,186	143,555	178,174
$\mathcal{E}_{ЭФФЕКТ}$, (%)	1,62	1,84	3,00	3,90	5,29	5,74	7,13

Если ограничиться сработкой водохранилища ниже проектной отметки на 7 м, то при выполнении вышеперечисленных ограничений можно получить дополнительную выработку электроэнергии в 178 млн. кВт·ч, что будет соответствовать снижению дефицита энергии в зимний период на 7 %.

Общий эффект от долгосрочной оптимизации режимов каскада ГЭС складывается от оптимального перераспределения стока и от дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС.

Таким образом, суммарный эффект от оптимизации долгосрочных режимов ГЭС составляет 9-11 % по выработке электроэнергии в каскаде.

В третьем разделе изложена математическая модель расчета краткосрочного оптимального распределения активной мощности между ГЭС по критерию минимума транзитного стока. Приведены примеры оптимального суточного распределения активной нагрузки между гидростанциями без учета потерь активной мощности и с учетом потерь активной мощности в сетях для годов различной водности. Также в данной главе приведены расчеты эффектов от долгосрочной и краткосрочной оптимизации режимов ЭЭС Республики Таджикистан. Основной эффект рассчитан как выработка дополнительной энергии, которая позволяет снизить дефицит электроэнергии в годовом разрезе.

В качестве критерия оптимального распределения нагрузки между гидроэлектростанциями энергосистемы Таджикистана предложено использовать критерий минимума расхода воды.

Допустим, что в энергосистеме работает j гидростанций ($j = 1, 2, \dots, n$). Каждая ГЭС за период T может израсходовать определенное количество воды. Задача заключается в том, чтобы в каждом расчетном интервале всего периода T получить оптимальное распределение нагрузки между станциями при заданном расходе.

Математическая модель оптимального распределения активной мощности:

$$1. \text{ Целевая функция: } Q = \sum_{t=1}^k \left(\sum_{j=1}^n Q_{jt} \Delta \tau_t \right) \Rightarrow \min, \quad (11)$$

где $t=1, 2, \dots, k$ – интервал времени, продолжительностью $\Delta \tau_t$ (всего интервалов - k).

2. Уравнения связи – расходная характеристика каждой ГЭС, - $Q_j(P_j)$.

3. Уравнения ограничений:

а) Для каждого расчетного интервала имеется балансовое уравнение активной мощности (k - уравнений):

$$W_{Pt} = P_{nt} + \Delta P_{\sum t} - \sum_{j=1}^n P_{jt}, \quad (12)$$

где $\Delta P_{\sum t}$ - суммарные потери активной мощности в электрической сети.

б) Для каждой ГЭС задается ограничения по стоку (n -уравнений), которые определяются по результатам долгосрочной оптимизации каскада ГЭС:

$$W_j = W_{Qj} - \sum_{t=1}^{t=k} Q_{jt} \cdot \Delta \tau_t = 0, \quad (13)$$

где W_{Qj} – заданные ограничения стока воды для j -й ГЭС, Q_{jt} – расход воды для j -й ГЭС в интервал времени t .

Функция Лагранжа имеет вид:

$$\Phi = \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^n Q_{jt} + \sum_{t=1}^k \lambda_t (\sum_{j=1}^n P_{jt} - P_{nt} - \Delta P_{\Sigma t}) + \sum_{j=1}^n \lambda_j (\sum_{t=1}^k Q_{jt} \Delta \tau_j - W_{Qt}) \Rightarrow \min, \quad (14)$$

Находя минимум относительно P_{jt} , λ_t , λ_j получим уравнения оптимального распределения активной нагрузки между ГЭС:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \frac{q_{1t}}{1 - \sigma_{1t}} = \lambda_2 \frac{q_{2t}}{1 - \sigma_{2t}} = \dots = \lambda_n \frac{q_{nt}}{1 - \sigma_{nt}} \\ P_{1t} + P_{2t} + \dots + P_{nt} = P_{nt} + \Delta P_{\Sigma t}, \end{array} \right. \quad (15)$$

где λ_j – неопределенный множитель Лагранжа, величина которого подбирается так, чтобы обеспечить ограничение стока воды на j -й ГЭС,

$$q_{jt} = \frac{\partial Q_j}{\partial P_j} - \text{относительный прирост расхода воды на } j - \text{й ГЭС в интервал}$$

времени t ,

$$\frac{1}{1 - \sigma_{jt}} = k - \text{представляет собой поправочные коэффициенты к относительным}$$

приростам станций, учитывающие потери мощности в электрических сетях,

$$\sigma_{jt} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma t}}{\partial P_j} - \text{относительный прирост потерь активной мощности в}$$

электрической сети, отнесенный к j -й ГЭС.

Были построены характеристики относительных приростов (ХОП) всех ГЭС каскада. Диапазон их изменения показан в таблице 3.

Таблица 3 – Диапазон изменения относительных приростов ГЭС

ГЭС	$P_{j \max}, \text{МВт}$	$q_{j \min} - q_{j \max}$ $\text{м}^3 / (\text{МВт} \cdot \text{с})$
Нурекская	3000	0,36-0,64
Байпазинская	600	1,65-3,1
Сангтудинская-1	670	1,5-2,88
Сангтудинская-2	220	5-7,5
Головная	240	3,88-4,28
Кайракумская	126	5-6,48

Из таблицы видно, что наименьший относительный прирост имеет Нурекская ГЭС. Эта объясняется тем, что Нурекская ГЭС имеет самый высокий напор, следовательно, у нее наименьший относительный прирост расхода воды. Сангтудинская – 2 имеет самый низкий напор, отсюда у нее наибольшие относительные приросты расхода воды. Относительный прирост расхода воды показывает эффективность использования м³ воды на ГЭС, т.е. чем меньше относительный прирост, тем эффективнее работа ГЭС. Поэтому при управлении режимами ЭЭС сначала загружаются те электростанции, у которых самые низкие относительные приросты, а затем все другие по мере их возрастания.

В соответствии с условием оптимизации (15) помимо относительных приростов расхода воды на ГЭС необходимо также рассчитывать относительные приросты потерь активной мощности в сети. Сложность в определении относительных приростов потерь активной мощности в сети заключается в том, что общие потери в сети в соответствии с условием оптимизации (16) необходимо разнести между всеми электростанциями, которые генерируют мощность в сеть. Решение этой задачи является весьма трудоемким, т.к. требует проведения большого количества расчетов.

Анализ значений позволил выдвинуть следующее предположение:

Если даже все потери активной мощности энергосистемы Таджикистана отнести на Нурекскую ГЭС, то учет относительного прироста потерь в сети σ в соответствии с условием (15) не повлияет на оптимальное распределение мощностей в ЭЭС, выполненное без учета σ .

Чтобы подтвердить эту гипотезу был проведен расчет потокораспределения в сети энергосистемы Республики Таджикистан и все потери были отнесены на Нурекскую ГЭС.

Задаваясь нагрузками на подстанциях, были получены различные режимы системы. Соответствующие потери в узлах потребления были рассчитаны по выражению

$$\sigma_{jt} = \frac{\partial \Delta P_{нагр\Sigma}}{\partial P_{нагр\Sigma}}, \quad (16)$$

где $P_{нагр\Sigma}$ – суммарная нагрузка сети, МВт, $\Delta P_{нагр\Sigma}$ – суммарные потери в сети, МВт.

Из проведенных расчетов следует, что учет относительного прироста потерь активной мощности в сети, может максимально изменить ХОП Нурекской ГЭС в 1,44 раза. Разница же в значениях ХОП Нурекской и Сангтудинская-1, как было сказано выше, составляет 2,2 раза.

Из этого сравнения следует, что учет потерь активной мощности в сети не может повлиять на оптимальное распределение мощности в ЭЭС республики Таджикистан. Поэтому оптимизацию краткосрочных режимов в дальнейшем можно вести без учета потерь активной мощности в электрической сети, что значительно их упрощает.

Расчет оптимального распределения активной мощности между ГЭС, методом равенства относительных приростов без использования специальных программ выполнить довольно трудно. Если ГЭС имеют различные ХОП (как в нашем случае), то неопределенный множитель Лагранжа λ_j , будет иметь различное значение для каждой ГЭС, что приводит к еще более усложнению поставленной задачи.

Для расчета оптимального распределения активной мощности между ГЭС, по критерию минимума расхода воды создана программа в среде Mathcad.

Оптимальный режим каждой ГЭС выполнялся на основе использования оптимальной эквивалентной характеристики каскада с учетом ограничений по мощности каждой ГЭС.

Оптимальная эквивалентная характеристика для всего каскада ГЭС строится следующим образом.

Сначала произвольно задавались неопределенные множители Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Далее определяется оптимальная эквивалентная характеристика по выражениям:

$$\begin{cases} q_c = \lambda_1 q_1 = \lambda_2 q_2 = \dots = \lambda_n q_n \\ N_c = N_1 + N_2 + \dots + N_n \end{cases} \quad (17)$$

$$N_{imin} \leq N_i \leq N_{imax}, i = 1, 2, \dots, n$$

где: q_c, N_c - эквивалентный относительный прирост и эквивалентная мощность, соответственно, N_{imin}, N_{imax} - соответственно минимальная и максимальная допустимые мощности i -ой ГЭС.

Результаты проведенных расчетов показаны в таблице 4. для одного из зимних месяцев, когда дефицит электроэнергии достигает максимальных значения (15 января 2016 года). Полученные расходы были сравнены с реальными расходами на ГЭС (таблица 4).

Таблица 4 – Расходы ГЭС с оптимизацией

ГЭС	$Q_{ср.сут.} \text{ м}^3 / \text{с}$		
	Фактические	С оптимизацией	Эффект
Нурекская	510	493	17
Байпазинская	482	493	-11
Сангтудинская 1	501	493	8
Сангтудинская 2	516	490	26
Головная	504	490	14
Кайракумская	800	714,807	85,193

Как видно из таблицы 4 при работе на транзитном стоке ГЭС Вахшского каскада можно получить эффект от оптимизации почти на всех ГЭС. Суммарный эффект от оптимизации привяжем к режиму работы Нурекской ГЭС, так как она имеет водохранилище сезонного регулирования и расположен выше всех ГЭС Вахшского каскада. Если использовать дополнительный объем воды в 17 м³/с (таблица 4) полученный на Нурекской ГЭС в результате проведения оптимизационных расчетов, то этот расход, проходя через турбины остальных ГЭС каскада, будет вырабатывать дополнительную электроэнергию (таблица 5).

Таблица 5 – Дополнительная выработка электроэнергии с оптимизацией

ГЭС	P, МВт	W _{сут} , кВт. час
Нурекская	33,9575	814980
Байпазинская	8,30875	199410
Сангтудинская 1	9,02402	216576,6
Сангтудинская 2	2,8033	67279,2
Головная	3,8148	91555,2
<i>Сумма каскада Вахи</i>	<i>57,90837</i>	<i>1389801</i>
Кайракумская	13,88901	333336,3
<i>Суммарная всех ГЭС</i>	<i>71,79738</i>	<i>1723137,35</i>

Суммарная дополнительная электроэнергия для всего зимнего периода, который составляет 3 месяца ($t_{зим}$) для ГЭС Вахшского каскада составляет:

$$W_{дон.Σ} = W_{дон.Вахи} + W_{дон.Кайр.} = 155,082 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{час}$$

Таким образом, путем краткосрочной оптимизации режимов ГЭС энергосистемы Таджикистана по критерию минимума расхода воды, можно снизить существующий зимний дефицит электроэнергии на 6,2 %.

В приложении к диссертации содержатся результаты исследования и материалы, подтверждающие внедрение данной работы.

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Проведен анализ существующих методов оптимизации режимов энергосистем и электростанций. В этих работах не проводились исследования и разработки методик которые позволяли бы оптимизировать режимов энергосистем с большой долей ГЭС, т.е. позволяющие учитывать специфические особенности энергосистемы Таджикистана.

2. На основе перераспределения стока между гидростанций Вахшского каскада внутри года можно получить дополнительную выработку электроэнергии, которая позволяют снизить зимний дефицит электроэнергии до 2-4 %.

3. Сработки водохранилища Нурекской ГЭС ниже проектной отметки УМО, с учетом всех ограничений позволяет получить дополнительную выработку электроэнергии. Сработка водохранилища Нурекской ГЭС на основе поиска компромиссного решения по режиму сработки водохранилища ниже УМО на 7 м, позволяет снизить дефицит до 7%.

4. Долгосрочная оптимизации режимов каскада ГЭС состоящая из оптимального перераспределения стока и дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС позволяют снизить зимний дефицит электроэнергии в энергосистема Таджикистан до 9 – 11 %.

5. Оптимизации суточных режимов ГЭС энергосистемы Таджикистана по критерию минимума расхода воды позволяет получить дополнительную выработку электроэнергии, которое позволяет снизить зимний дефицит электроэнергии на 6,2 %.

Таким образом долгосрочная и краткосрочная оптимизации режимов ГЭС позволяют снизить зимний дефицит электроэнергии в энергосистема Таджикистан до 15 – 17 %.

Разработанные методики и результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании оптимизационных программ планирования режимов диспетчерскими службами ЭЭС РТ, а также при оптимизации краткосрочных и долгосрочных режимов работы системы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Султонов, Ш.М.** Применение оптимизационных методов для наивыгоднейшего распределения активной мощности между гидроэлектростанциями энергосистемы Таджикистана / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов, А.Д. Мехтиев // Вестник Таджикского технического университета. – 2014. – №4. – С. 60-64.
2. **Султонов, Ш.М.** Метод оптимизации распределения нагрузки между ГЭС / Ю. А. Секретарев, Ш.М. Султонов // Главный энергетик. – 2015. – № 2. – С. 51-52.
3. **Султонов, Ш.М.** Повышение выработки электроэнергии в Таджикистане на основе оптимизации режимов ГЭС. / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов, В.Г. Шальнев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С.14-17.

Публикации в зарубежных изданиях:

4. **Sultonov, Sh.** Implementation of the Method of Lagrange for Optimal Modes of Energy System of Tajikistan / Sh.M. Sultonov, Y.A. Sekretarev, S.V. Mitrofanov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – pp. 726-731. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.726.
5. **Sultonov, Sh.** Optimal Control Mode of the Vakhsh Hydropower Reservoirs to Reduce Electricity Shortages in Tajikistan / Yuri Sekretarev, Sherkhon Sultonov and Victor Shalnev // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792. – pp. 446-450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.446.

Материалы международных и всероссийских конференций:

6. **Султонов, Ш.М.** Совершенствование управления Таджикской энергосистемой с высокой долей гидравлической мощности на основе оптимизации ее режимов / Ш.М. Султонов // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск. – 2014. – С. 132-136.
7. **Султонов, Ш.М.** Назначение оптимальных режимов энергосистемы Таджикистана / Ш.М. Султонов, Ю.А. Секретарев, С.В. Митрофанов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014): сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 107-110.
8. **Султонов, Ш.М.** Принятие решений при внутростанционной многокритериальной оптимизации состава агрегатов ГЭС / Ю.А. Секретарев, С.В. Митрофанов, Ш.М. Султонов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014): сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 103-107.
9. **Султонов, Ш.М.** Назначение оптимальных режимов водохранилищ ГЭС Вахшского каскада для снижения дефицита электроэнергии в Таджикистане / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов Второй Всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск, – 2015 г. – С. 81-84.

10. Султонов, Ш.М. Оптимальное управление режимами водохранилищ Вахшских ГЭС для повышения выработки электроэнергии в Таджикистане / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов, В.Г. Шальнев // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII междунар. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2015. – Ч. 3. Секция «Энергетика». – С. 173-177.

11. Султонов, Ш.М. Оптимальное распределение нагрузки между гидроэлектростанциями Таджикской энергосистемы на основе метода равенства относительных приростов / Ш.М. Султонов // Современные техника и технологии: сб. труд. XXI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2015. – С. 173-175.

12. Султонов, Ш.М. Краткосрочная оптимизация режимов ГЭС энергосистемы Таджикистана / Ш.М. Султонов, М.Х. Назаров // «Энергия–2016»: материалы конференции XI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 7 т. Т. 3 / Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2016. – С. 222-223.

13. Султонов, Ш.М. Возможность дополнительной сработки водохранилища Нурекской ГЭС для увеличения её выработки / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов, М.Х. Назаров // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов Третьей Всерос. науч.-практ. конф., Саяногорск. – 2016 г. – с. 384-388.

14. Sulstonov, Sh. Modern State Problems and Prospects of Development of the Electric Power System of Tajikistan / Yuri Sekretarev, Sherkhon Sulstonov, Muso Nazarov // Proceedings of the 11th international forum on strategic technology 2016 (IFOST 2016). – Novosibirsk, Russia. – 2016. – pp. 136-139.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ 1130. Подписано в печать 07.07.2016 г.