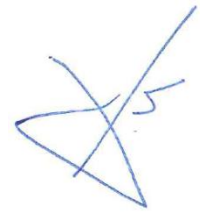


На правах рукописи



Мардыханов Айрат Ханифович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СРЕДНЕСРОЧНЫХ И
КРАТКОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Инженерная кибернетика»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Шарифуллин Вилен Насибович

Официальные оппоненты:

Александровский Алексей Юрьевич

доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»

Болгов Михаил Васильевич

доктор технических наук, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод

Ведущая организация:

Акционерное общество Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (АО «НИИЭС»), г. Москва

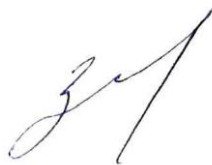
Защита состоится «17» сентября 2019г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=94>

Автореферат разослан «__» _____ 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из аспектов успешного развития любой отрасли является организация безопасной, экономичной, научно-обоснованной и эффективной работы производственных объектов. Особенно это актуально в одной из ведущих отраслей экономики нашей страны – электроэнергетике. Электроэнергетика состоит из нескольких систем, тесно взаимосвязанных друг с другом. Одну из наиболее заметных ролей в данной системе играет гидроэнергетический комплекс. На долю гидроэнергетического комплекса приходится около 20% всей выработанной электрической энергии в стране. В обеспечении оптимального и надежного электроснабжения всех отраслей, гидроэлектростанции играют заметную роль. Высокая надежность работы электросилового оборудования, высокая производительность труда, отсутствие транспортных операций по перевозкам топлива, высокая маневренность и быстрота выполнения операций по пуску и останову генерирующего оборудования – все это делает гидроэлектростанции, по существу, незаменимыми источниками энергоснабжения.

Работа гидроэнергетического комплекса не ограничивается интересами исключительно энергетической системы (выработка электроэнергии, регулирование частоты электрического тока и покрытие переменной части графиков нагрузки, регулирование напряжения путем выработки реактивной мощности в режиме синхронного компенсатора и др.), оно имеет многоцелевое использование. В рамках деятельности гидроэнергетической системы в том числе обеспечиваются интересы следующих систем: экологии, сельского хозяйства, коммунального и промышленного водоснабжения, речного транспорта (грузового и пассажирского), рыбного хозяйства и др.

В данных условиях обеспечение минимального вредного воздействия гидроэнергетического комплекса на водохозяйственные системы и окружающую среду имеет высокую степень сложности. Ошибки в расчетах могут иметь значительные отрицательные последствия как для водохозяйственной среды, так и для энергетической отрасли.

В рамках данной работы представлена методика моделирования и оптимизации среднесрочных режимов работы гидроэнергетического комплекса в условиях обеспечения потребностей энергетических и водохозяйственных систем на примере Волжско-Камского каскада гидроэлектростанций. Оптимизационная модель позволяет минимизировать вредное воздействие эксплуатации гидроэнергетического комплекса на окружающую среду, и при этом обеспечивать ключевые потребности единой энергетической и водохозяйственной систем России.

Помимо этого, представлена методика внутростанционной оптимизации краткосрочных (суточных) режимов работы гидроэлектростанции в условиях функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ).

Одной из особенностей суточного графика нагрузки ГЭС в современных условиях является его неравномерность, связанная в основном условиями неравномерного распределения цены отпущенной электроэнергии в течении суток (дифференцированная цена в условиях функционирования ОРЭМ). На режим работы гидроэлектростанции, в условиях неравномерного распределения суточной нагрузки, существенное влияние оказывает особенности технологического процесса производства электроэнергии. В данное понятие входит необходимость учета изменения во времени уровней верхнего и нижнего бьефов, разного рода технологические ограничения режимов работы гидроагрегатов, выбор количества и состава гидроагрегатов, схема электрической коммутации агрегатов на генераторном напряжении и др. В этих условиях ГЭС, как самостоятельное предприятие стремится формировать наиболее оптимальные для себя краткосрочные (суточные) режимы работы в условиях наличия ограничений по указаниям регламентирующих организаций либо существующей документации.

Объект исследования: Гидроэнергетический комплекс каскада ГЭС (на примере Волжско-Камского каскада гидроэлектростанций).

Предметом исследования являются методы повышения эффективности эксплуатации гидроэнергетических систем.

Целью данной работы является разработка и апробация методики моделирования и оптимизации режимов работы гидроэнергетического комплекса в условиях обеспечения потребностей энергетических и водохозяйственных систем с разработкой программного комплекса, функционирующего с сети интернет, позволяющего рассчитывать оптимальные режимы работы как среднесрочных режимов работы каскадных ГЭС, так и краткосрочных (суточных) режимов работы отдельных ГЭС каскада.

Для достижения поставленной цели решить следующие задачи:

1. Анализ функционирования гидроэнергетического комплекса с описанием общих принципов функционирования каскада и его влияние на энергетические и водохозяйственные комплексы.

2. Разработка математической модели гидроэнергетической системы с описанием структуры функционирования каскада.

3. Разработка методики формирования среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетической системы в условиях обеспечения интересов энергетических и водохозяйственных систем.

4. Разработка программного комплекса, который позволяет проводить имитационные расчеты режимов работы гидроэнергетического комплекса в условиях стохастического прогноза притока воды в водохранилища каскада.

5. Разработка методики оптимального планирования краткосрочного (суточного) режима работы ГЭС с учетом функционирования ОРЭМ.

Научная новизна.

1. Разработана методика и алгоритм поиска компромиссных решений по формированию среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетической системы в условиях наличия неопределенного количества требований участников водохозяйственного комплекса.

2. Разработана методика и алгоритмы оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

3. Разработана методика и алгоритм прогноза уровня нижнего бьефа гидроузлов на основании непрерывной калибровки существующих характеристик по данным телеметрических измерений.

4. Разработан метод и алгоритм непрерывного контроля комбинаторного рассогласования лопаток направляющего аппарата с лопастями рабочего колеса поворотно-лопастных гидротурбин.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты исследований позволили разработать новый методический подход к планированию среднесрочных и краткосрочных режимов работы гидроэнергетических систем.

Практическая значимость работы.

1. Разработан программный комплекс расчета компромиссных решений по формированию среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетической системы в условиях наличия неопределенного количества требований участников водохозяйственного комплекса (<http://hydrocascade.com>).

2. Разработан программный комплекс оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

3. Разработано программное решение прогноза уровня нижнего бьефа гидроузлов на основании непрерывной калибровки существующих характеристик по данным телеметрических измерений.

4. Программный продукт эксплуатируется в АО «Татэнерго» для расчета режимов функционирования Нижнекамской ГЭС. Экономический эффект от реализации автором рационализаторского предложения «исследование оптимальных ограничений мощности русловых каскадных ГЭС с учетом текущего вибрационного состояния генерирующего оборудования в рамках действующих регламентов ОРЭМ» составил в первый год внедрения 99,9 млн. рублей, во второй год внедрения 99,1 млн. рублей. Экономический эффект от реализации автором рационализаторского предложения «автоматизированная система планирования суточной нагрузки ГЭС в условиях дифференцированной цены на электроэнергию» составил в первый год внедрения 3,4 млн. рублей, во второй год внедрения 3,3 млн. рублей. Таким образом, среднегодовой экономический эффект от реализации автором рационализаторских предложений, функционирующих на основании разработанных в рамках данной работы методик, составляет ~ 102,85 млн. рублей ежегодно (*Акт о внедрении результатов исследования*).

5. Разработанный программный комплекс формирования режимов функционирования гидроэнергетической системы используется в АО «Татэнерго» и Министерстве экологии и природных ресурсов Республики Татарстан для подготовки предложений к заседаниям межведомственной рабочей группы по формированию режимов работы ГЭС Волжско-Камского каскада при Федеральном агентстве водных ресурсов (*Акт о внедрении результатов исследования*).

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решаются с помощью методов математического и имитационного моделирования. Для оценки достоверности полученных результатов выполнялось сопоставление расчетов с фактическими данными режимов работы гидроэлектростанций Волжско-Камского каскада.

На защиту выносятся:

1. Методика и алгоритм поиска компромиссных решений по формированию среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетической системы в условиях наличия неопределенного количества требований участников водохозяйственного комплекса.

2. Методика и алгоритмы оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

3. Методика и алгоритм прогноза уровня нижнего бьефа гидроузлов на основании непрерывной калибровки существующих характеристик по данным телеметрических измерений.

4. Метод и алгоритм непрерывного контроля комбинаторного рассогласования лопаток направляющего аппарата с лопастями рабочего колеса поворотного-лопастных гидротурбин.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов: Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы данными, полученными при проведении расчетов режимов работы Волжско-Камского каскада ГЭС. Достоверность проведенных исследований подтверждается корректным использованием математического аппарата и средств разработки программного обеспечения.

Личное участие автора заключается: в определении целей и задач исследований; выборе методологической и информационной базы; проведении исследований, разработке методик и алгоритмов; разработке программного комплекса.

Соответствие паспорту специальности 05.14.01 «Энергетические системы и комплексы»: 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.

Внедрение результатов работы. Разработанный программный комплекс формирования режимов функционирования гидроэнергетической системы используется в АО «Татэнерго» и Министерстве экологии и природных ресурсов Республики Татарстан для подготовки предложений к заседаниям межведомственной рабочей группы по формированию режимов работы ГЭС Волжско-Камского каскада при Федеральном агентстве водных ресурсов. Расчеты краткосрочных (суточных) режимов работы Нижнекамской ГЭС (филиал АО «Татэнерго») проводятся в АО «Татэнерго» на ежедневной основе. Среднегодовой экономический эффект от реализации автором рационализаторских предложений, функционирующих на основании разработанных в рамках данной работы методик, составляет ~ 102,85 млн. рублей ежегодно.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Региональной конференции по диспетчеризации в электроэнергетике (Казань, 2011), на Всероссийской конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2012), на межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Камские чтения» (Набережные Челны, 2010), на международной научно-практической конференции «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах» (Пенза, 2011), на XV Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань, 2015), на молодежной научно-практической конференции ОАО «Генерирующая компания» - 2015 (г. Казань, 2015г.), на молодежной научно-практической конференции АО «Татэнерго» - 2017 (Казань, 2017), на XXV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2019), на XIV Всероссийской (Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2019» (Иваново, 2019).

Публикации. Диссертационная работа нашла отражение в опубликованных автором статьях и докладах. По результатам выполненных в работе исследований опубликованы 16 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, 8 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография, 5 публикаций в прочих изданиях и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав (глава 1: «Анализ функционирования гидроэнергетического комплекса»; глава 2: «Разработка методики формирования среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетических систем»; глава 3: «Разработка методики формирования краткосрочных режимов ГЭС»; глава 4: «Разработка программного комплекса»), основных результатов, выводов и библиографического списка, включающего 112 наименований. Работа проиллюстрирована 53 рисунками, 12 таблицами и 62 уравнениями. Приложения занимают 6 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены основная цель и направление исследований, обоснованы актуальность и важность поиска оптимальных режимов работы гидроэнергетической системы в условиях обеспечения потребностей энергетических и водохозяйственных систем, а также оптимальных краткосрочных режимов гидроэлектростанций в условиях ОРЭМ. Формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу функционирования гидроэнергетического комплекса, а также выявлению ключевых проблем формирования режимов работы системы каскада ГЭС.

Гидроэлектростанции в гидроэнергетической системе могут иметь как гидрологические и гидравлические связи друг с другом, так и энергетические и водохозяйственные. Гидрологическая связь каскада ГЭС подразумевает перераспределение расхода воды на каждой ступени благодаря возможности регулирования стока водохранилищ. При этом сток реки может быть снижен по причине изъятия водных ресурсов со стороны отдельных отраслей народного

хозяйства, либо испарения с поверхности водохранилищ. При этом гидроэлектростанции каскадного типа входят в состав двух систем: энергетической и водохозяйственной, каждая из которых обеспечивает многие отрасли народного хозяйства. Это заставляет рассматривать задачу оптимизации режима гидроэнергетической системы как общесистемную, неразрывно связанную с особенностями энергетического производства и водохозяйственной деятельности.

В настоящее время отсутствует эффективная модель эксплуатации гидроэнергетического комплекса, которая позволяет в равной доле учитывать интересы всех водопользователей. Наличие индивидуальных для каждого водохранилища ПИВР не позволяет решать задачи оптимального распределения стока между гидроузлами, которое сводится к компромиссному удовлетворению требований участников ВХК. Данное обстоятельство год от года все больше обостряет противоречия между водопользователями, что в свою очередь приводит как к ухудшению энергетической эффективности работы ГЭС в ЕЭС России, так и к ухудшению эффективности работы водохозяйственного комплекса.

Существующие методы среднесрочной оптимизации режимов работы каскада ГЭС либо потеряли актуальность, либо удовлетворяют интересы отдельного определенного круга водопользователей. Оптимизационная модель должна учитывать интересы всех водопользователей водных ресурсов. При этом очевиден тот факт, что в зависимости от всевозможных условий (времени года, водности и др.) количество требований водопользователей может меняться как в большую, так и в меньшую сторону.

К тому же настоящий этап развития энергетики характеризуется большей свободой электрических станций: нет РАО ЕЭС, нет жесткой привязки к тепловым станциям (ТЭС), появился оптовый рынок электроэнергии, в связи с чем возникают новые задачи краткосрочной (суточной) оптимизации режимов работы гидроэлектростанций в условиях адаптации используемой модели к постоянному контролю за комбинаторным рассогласованием лопаток направляющего аппарата с лопастями рабочего колеса поворотно-лопастных гидротурбин.

Таким образом, ключевой проблемой формирования режимов работы гидроэнергетической системы является отсутствие эффективной модели среднесрочной эксплуатации гидроэнергетического комплекса, которая позволяет в равной доле учитывать интересы всех водопользователей, а также отсутствие модели оптимизации краткосрочных (суточных) режимов работы гидроэлектростанций, учитывающей наличие оптового рынка электроэнергии и функционирующей в условиях адаптации используемой модели к постоянному контролю за комбинаторным рассогласованием гидротурбин ГЭС.

Во второй главе выполнена разработка методики формирования среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетического комплекса с учетом компромиссного удовлетворения интересов участников ВХК.

В качестве объекта моделирования гидроэнергетической системы использовался Волжско-Камский каскад гидроэлектростанций, который расположен на р.Волга и ее притоке р. Кама. Каскад состоит из 8-ми крупных ГЭС на Волге: Ивановской, Угличской, Рыбинской, Горьковской, Чебоксарской, Жигулевской, Саратовской и Волжской и 3-х ГЭС на Каме – Камской, Воткинской и Нижнекамской.

Стоит отметить, что по сравнению с другими водохранилищами Волжско-Камского каскада, Рыбинское водохранилище имеет неполное многолетнее регулирование стока. В рамках данной работы, в качестве допущения, данный водоем рассматривался в формате годового регулирования стока.

Задача оптимального распределения стока между гидроузлами в детерминированной постановке сводится к определению такого среднесрочного режима функционирования гидроэнергетической системы, при котором реализуются максимально возможное количество условий оптимальности участников водохозяйственной деятельности (ранжированное по важности) и соблюдаются заданные режимные ограничения. Полученное распределение воды и уровней можно считать компромиссным решением задачи многокритериальной оптимизации.

Условия оптимальности водообеспечения участников водохозяйственного комплекса: Для рассматриваемой режимной задачи условия оптимальности могут иметь различные математические формы и соответствующие числовые показатели в зависимости от характера требований, предъявляемых системой для достижения выгодного режима.

При этом в каждом конкретном году с учетом складывающейся обстановки в энергетической и водохозяйственной системах, количество условий оптимальности может как увеличиваться, так и снижаться.

Условия оптимальности и ограничения по ведению среднесрочных режимов работы гидроэнергетической системы каскада можно разделить по соответствующим отраслям народного хозяйства: речной транспорт; сельское хозяйство; рыбное хозяйство; энергетическая отрасль и другие отрасли. Каждая из отраслей имеет ряд требований, которые предъявляются Федеральному агентству водных ресурсов.

Речной транспорт предъявляет требования к режиму ГЭС в части уровней воды в верхних и нижних бьефах гидроузлов, среднеинтервальных и характерных расходов попусков воды. В навигационный период уровни водохранилищ не должны снижаться ниже некоторых минимальных навигационных отметок. Требования сельского хозяйства заключаются в отборе воды из верхних и нижних бьефов ГЭС для питания оросительных систем. Основные отборы воды производятся в летний поливной период, кроме того, должна учитываться возможность поливов и для осеннего увлажнения почвы. Одним из основных требований рыбного хозяйства в водохранилищах является поддержание по возможности постоянных уровней воды в верхнем бьефе гидроузла, без резкого снижения их на период нереста (ограничения на уровни и скорости изменения уровней воды). В зимний период рыбное хозяйство заинтересовано в более поздней и меньшей по высоте сработке водохранилищ для предотвращения замора рыбы из-за недостатка кислорода в воде.

Требования энергетики сводятся в первую очередь к обеспечению гарантированных среднемесячных мощностей. Регламентируется также снижение мощностей ГЭС ниже гарантированных для крайне маловодных условий. Гарантированные средние мощности ГЭС обеспечивают гарантированное участие ГЭС в балансах мощности и энергии энергосистем, т.е. такое участие, при котором не будет дефицитов мощности и энергии в энергосистемах.

Требования коммунального и промышленного водоснабжения определяются допустимыми минимальными и максимальными уровнями воды в районах расположения водозаборов. Санитарные требования обычно сводятся к обеспечению минимальных санитарных попусков воды. Возможны случаи режимов отдельных залповых попусков воды из водохранилищ в целях промывки илистых отложений в реке. Немаловажным фактором является влияние гидроэнергетического комплекса на окружающую среду. В рамках данного исследования учитывались в том числе требования экологии.

Метод последовательных уступок и алгоритм расчета среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетического комплекса: особенностью рассматриваемой задачи является наличие множественности внешних условий, требующих рассмотрения многих требований (критериев). При этом в зависимости от внешних и внутренних условий количество требований может быть разным.

Частные критерии оптимальности R_{ij} (i – номер дня расчетного периода; j – номер ГЭС в каскаде) и целевые функции для отдельных участников ВХК, кроме ГЭС, выразить количественно очень сложно. Однако, очевидно, что они являются функциями расходов воды Q_{ij} в каждом гидроузле и в каждый временной период, т.е. $R_{ij}=R_{ij}(Q_{ij})$. Участники же ВХК могут указать требования к расходам воды через гидроузел Q_{ij} , уровням верхнего и нижнего бьефов Z_{ij} либо требования по выработке электроэнергии P_{ij} , обеспечивающим для них максимум эффекта. Требования могут выражаться как в форме максимизации/минимизации параметра, так и в форме ограничения. В этом случае задача оптимального распределения стока между гидроузлами сводится к компромиссному удовлетворению требований по Q_{ij} или Z_{ij} или P_{ij} для

всех участников ВХК. Полученное распределение воды можно считать компромиссным решением задачи многокритериальной оптимизации. Для решения поставленной задачи разработана методика последовательных уступок при распределении стока по всем гидроузлам каскада в каждый временной период. Алгоритм формирования режимов работы каскада гидроузлов сводится к поэтапному выполнению ряда нижеописанных задач.

1. В первую очередь задается расчетный период. Этот период обусловлен особенностями стока реки в разные временные диапазоны. Данный расчетный период разбивается на n дискретных интервалов. Очевидно, что чем больше длительность расчетных интервалов (следовательно, чем меньше число интервалов), тем меньше трудоемкость решения, но тем больше погрешность за счет осреднения внутри расчетных интервалов стоковых и режимных параметров. В общем случае длительность расчетных интервалов может быть тем больше, чем меньше изменчивость во времени речного стока и чем выше регулирующая способность водохранилищ.

2. Далее, индексами i и j обозначаются, соответственно, номер расчетного интервала и номер ГЭС (все ГЭС каскада нумеруются сверху вниз либо по течению реки, либо по уровням высот по Балтийской системе). Таким образом рассматривается i расчетных интервалов и j ГЭС.

3. Далее в расчетную модель заполняются детерминированное задание гидрографов рек, а также требования участников ВХК по установлению режимов работы отдельных гидроузлов каскада на предстоящий период. Данные требования формируются в виде математического описания условий оптимальности либо ограничений системы, подробно рассмотренных во второй главе.

4. На следующем шаге осуществляется импорт (загрузка) исходных данных в расчетную модель. Загрузка данных проводится по всем ГЭС каскада до начала расчетного периода. В главе 4 подробно описывается данный процесс.

Таким образом, на начало расчетного периода должны быть детерминировано заданы все необходимые для расчета параметры. При запаздывании в добегании расходов воды между ступенями каскада необходимо также задание расходов воды в нижние бьефы ГЭС для нескольких предшествующих расчетных интервалов. Конечные условия также могут быть заданы в виде уровней водохранилищ на конец расчетного периода, когда эти уровни известны, например, уровня предполоводной сработки водохранилищ или условия заполнения до отметок НПУ водохранилищ сезонного (годового) регулирования к концу весеннего половодья.

5. После загрузки данных проводится обработка параметров с последующей актуализацией существующих характеристик. Алгоритм актуализации заложен в разработанном программном продукте, процесс расчета занимает незначительное время. Осуществляется проверка на адекватность модели и достижения прогнозирования основных параметров в границах допустимых интервалов.

6. Далее, экспертным путем осуществляется качественный анализ относительной важности(приоритета) требований каждого участника ВХК. На основании такого анализа требования участников нумеруются в порядке убывания важности(приоритета) $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ (таблица 1).

Таблица 1. Порядок убывания важности(приоритета) требований участников ВХК

Номер приоритета	Требование
1	$R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min;$
2	$R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min;$
...	...
n	$R_n(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min;$

где $Q_{i,j}$ – расход воды через гидроузел j в i -й интервал времени; W_j – параметр расхода Q_j либо уровня воды Z_j у гидроузла.

7. Затем решается задача по поиску решения для первого по важности требования $R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min$, при этом расчет осуществляется по всему каскаду гидроузлов и для всего расчетного периода.

8. На следующем этапе назначается величина «допустимой» уступки ΔW_1 для первого требования $R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j})$ и решается задача по поиску решения для второго по важности требования $R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min$. При этом первое требование переходит в разряд ограничения с условием, что найденное ранее решение W_1 может изменяться в пределах уступки ΔW_1 :

$$\begin{aligned} R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &= W_j \rightarrow \max/\min; \\ R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_1 - \Delta W_1 \text{ или } R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_1 + \Delta W_1; \\ \Delta W_1 &\geq 0. \end{aligned}$$

9. На последующем этапе назначается величина «допустимой» уступки ΔW_2 уже для второго требования $R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j})$ и решается задача по поиску решения третьего по важности требования $R_3(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) = W_j \rightarrow \max/\min$ с ограничениями по первому и второму требованиям в пределах их уступок:

$$\begin{aligned} R_3(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &= W_j \rightarrow \max/\min; \\ R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_1 - \Delta W_1 \text{ или } R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_2 + \Delta W_1; \\ R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_2 - \Delta W_2 \text{ или } R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_2 + \Delta W_2; \\ \Delta W_1 &\geq 0 \quad \Delta W_2 \geq 0. \end{aligned}$$

И так далее, пока не будет решена задача по последнему требованию участника ВХК:

$$\begin{aligned} R_n(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &= W_j \rightarrow \max/\min; \\ R_1(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_1 - \Delta W_1 \text{ или } R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_2 + \Delta W_1; \\ R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_2 - \Delta W_2 \text{ или } R_2(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_2 + \Delta W_2; \\ &\dots\dots \\ R_k(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) &\geq R_k - \Delta W_b \text{ или } R_k(Q_{1,j} \dots Q_{i,j}) \leq R_k + \Delta W_b \quad k = \overline{1, n-1}; \\ \Delta W_1 &\geq 0 \quad \Delta W_2 \geq 0 \dots \Delta W_k \geq 0 \quad k = \overline{1, n-1}. \end{aligned}$$

При этом для каждой пары последовательно анализируемых требований необходимо задать несколько значений уступок ΔW_k и определить изменения максимальных значений ΔW_{k+1} с учетом соотношения значимости рассматриваемых требований.

В результате применения указанного подхода удастся сгенерировать различные варианты решений при различных сочетаниях условий, а анализ количественных характеристик этих вариантов дает возможность отобрать наиболее представительные. При этом решение задачи оптимального распределения стока между гидроузлами приводит к компромиссному удовлетворению требований по Q_{ij} и Z_{ij} для всех участников ВХК. Полученное распределение воды и уровней можно считать компромиссным решением задачи многокритериальной оптимизации.

При поиске решения по очередному требованию участника с учетом всех ограничений и допущений используется имитационный подход, который состоит из следующих этапов:

- задаются значения параметра Q_{ij} по всем гидроузлам каждого расчетного периода;
- в рамках заданного требования участника ВХК и существующих ограничений производится водно-энергетический расчет;
- корректируются значения параметра Q_{ij} . Проводится новый водно-энергетический расчет;
- из множества полученных наборов показателей водно-энергетических режимов каскада ГЭС выбирают набор показателей, который в наибольшей степени соответствует заданному условию оптимальности участника ВХК при выполнении всех ограничений и допущений.

Разработанный алгоритм опробован на примере расчета режимов функционирования гидроузлов Волжско-Камского каскада на период с 11 января по 31 марта 2018г. с учетом требований участников водохозяйственного комплекса. На рисунке 1 представлен пример итогового расчета режимов по одному из гидроузлов каскада - Воткинскому гидроузлу.

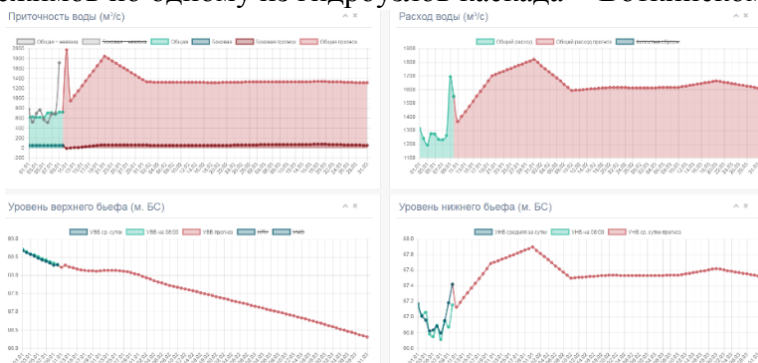


Рисунок 1. Результаты расчетов по Воткинскому гидроузлу

Системный эффект от использования разработанной методики заключается в максимально возможном удовлетворении требований участников энергетических и водохозяйственных систем гидроэнергетического комплекса.

В процессе реального формирования среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетического комплекса составляется список их нескольких десятков требований водопользователей ВКК, а также ограничений, описанных в ПИВР и других НТД. В диссертационной работе, с целью упрощения процедуры описания расчета, представлено ограниченное количество требований участников ВКК.

В третьей главе выполнена разработка методики, алгоритмов и программы формирования оптимальных краткосрочных режимов функционирования ГЭС. Целью моделирования и оптимизации краткосрочного режима является максимизация прибыли при дифференцированной цене на электроэнергию (оптовый рынок электроэнергии и мощности) с учетом существующих ограничений и допущений, а также непрерывного контроля за комбинаторным рассогласованием лопаток направляющего аппарата с лопастями рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины.

В качестве примера моделирования и оптимизации краткосрочных режимов функционирования гидроэлектростанции использовалась Нижнекамская ГЭС, которая входит в Волжско-Камский каскад и находится на водном пути между Жигулевской ГЭС и Воткинской ГЭС.

Модель производства электроэнергии на ГЭС включает в себя в том числе уравнения мощности гидроагрегатов, баланса расхода воды и напора гидроузла. Подробное описание данных уравнений изложено в текущей работе.

В процессе формирования математической модели производства электроэнергии на ГЭС были реализованы следующие алгоритмы прогноза: модель и алгоритм прогноза уровня нижнего бьефа в условиях его нестационарности; модель и алгоритм расчета потерь напора на сороудерживающих решетках; метод определения комбинаторного рассогласования лопаток направляющего аппарата с лопастями рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины; алгоритм оптимизации количества и состава работающих гидроагрегатов и другие.

Алгоритмы прогноза строятся на принципе непрерывного обновления исходных данных. Данный принцип позволяет в разработанной модели в режиме реального времени осуществлять корректировки существующих зависимостей.

К тому же стоит отметить, что при расчете оптимального количества и состава включенного генерирующего оборудования используются обновленные энергетические характеристик гидротурбин Нижнекамской ГЭС

Критерий оптимальности формирования краткосрочных режимов:

гидроэлектростанция как коммерческая организация стремится наиболее рационально для себя использовать ограниченные по объему и регламентированные во времени запасы гидроэнергоресурсов. До реформирования системы электроэнергетики, в энергосистеме решались задачи расчета оптимального режима ГЭС в составе общесистемных задач. Для самой ГЭС устанавливалась задача оптимальным способом реализовать заданный энергосистемой план работы в виде суточного графика нагрузки, при этом, естественно, критерий оптимальности должен был быть неразрывно связан с общесистемными критериями. В научных работах того времени вопросы организации оптимального режима работы ГЭС исходили из условий необходимости реализации заданных с верхнего уровня управления планов суточной нагрузки ГЭС. С появлением оптового рынка электроэнергии существенно меняется порядок режима работы ГЭС.

Экономический анализ показал, что наиболее объективным показателем функционирования ГЭС является прибыль, поэтому этот показатель выбран в качестве основного критерия экономической эффективности производства электроэнергии на ГЭС. Наряду с этим может быть поставлена и задача многокритериальной оптимизации, например, максимизации прибыли и минимизации себестоимости электроэнергии. Однако в данной работе решалась задача только однокритериальной оптимизации.

Таким образом, для максимизации прибыли необходимо максимизировать доход и минимизировать издержки (затраты на ремонт) путем контроля комбинаторной зависимости и потерь напора на сороудерживающих решетках:

$$P(Q_1 \dots Q_{24}) \rightarrow \max$$

$$C_{\text{ремонт_комбинатор}} + C_{\text{ремонт_решеток}} \rightarrow \min$$

Одним из условий оптимальности режима работы ГЭС является критерий максимума дохода при дифференцированной цене на электроэнергию (оптовый рынок электроэнергии и мощности) с учетом ограничений и допущений:

$$P(Q_1 \dots Q_{24}) = \sum N(t) * C(t) * \Delta t \rightarrow \max$$

где P – доход от продажи электроэнергии за сутки, руб; t – длительность расчетного интервала времени $1 \div 24$; $C(t)$ – цена на продаваемую электроэнергию на ОРЭМ, руб/(кВт*ч); $N(t)$ – вырабатываемая станцией активная мощность, кВт; $Q(t)$ – расход воды в нижний бьеф ГЭС, м³/с.

При оптимизации использовались следующие ограничения на изменение переменных: 1) Режим поддержания верхнего уровня воды у плотины гидроузла в пределах отметок НПУ (нормальный подпорный уровень) и УМО (установленная минимальная отметка), т.е. между $Z_{в.мин}$, $Z_{в.макс}$ без учета сгонно-нагонных ветровых явлений; 2) Минимальный среднесуточный расход через створы ГЭС - санитарный сброс (на Нижнекамской ГЭС 600 м³/с); 3) суточный расход воды через гидроагрегаты должен быть равен суточному расходу воды через створы ГЭС (приточность минус среднесуточные прочие расходы), $\sum Q_i \Delta t = 24 Q_{ГЭС}$; 4) уровни воды в нижнем и верхнем бьефах не должны выходить из интервалов $Z_{н.б.}^{min} \leq Z_{н.б.} \leq Z_{н.б.}^{max}$, $Z_{в.б.}^{min} \leq Z_{в.б.} \leq Z_{в.б.}^{max}$; 5) ограничение по минимальной и максимальной мощности ГЭС, т.е. $N_{min} \leq N \leq N_{max}$ и др.

Поставленная выше задача оптимального планирования суточной нагрузки относится к задачам однокритериальной многомерной оптимизации со смешанным типом ограничений на изменение переменных. Для ее решения можно использовать несколько методов нелинейного программирования, например, методы сканирования, покоординатного спуска, случайного поиска, градиентные методы и т.д. Однако у задачи планирования нагрузки ГЭС при дифференцированной цене на электроэнергию на ОРЭМ имеются свои особенности, которые позволяют предложить упрощенный метод решения данной задачи оптимизации.

Предлагаемый метод оптимизации учитывает особенности решаемой задачи. На первом этапе проводится ранжирование часовых нагрузок в порядке роста цен на электроэнергию, на

втором этапе нагрузкам при минимальных и максимальных ценах присваиваются минимально и максимально возможные значения, на третьем этапе проводится варьирование оставшихся нагрузок по критерию максимума дохода.

При расчете экономического эффекта за счет оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС сравнивались 3 режима работы гидроэлектростанции: равномерный режим, фактический режим и предлагаемый режим.

В качестве расчетной даты принят 03 февраля 2011г. Так как расчет проводится на основе исторических данных, объективным критерием служит равный суточный объем выработанной активной мощности. Располагаемая мощность (установленная мощность за вычетом ограничений и ремонтной мощности) составляет 310 МВт. При равномерном режиме часовые объемы выработки равны 1/24 части общего суточного объема.

На рисунке 3 приведены цены на электроэнергию (ИБР и РСВ) на ОРЭМ за 03 февраля 2011г.

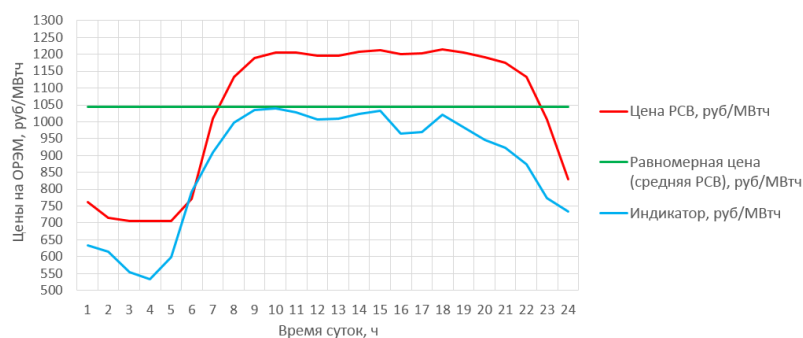


Рисунок 3. Цены на электроэнергию (ИБР и РСВ) на ОРЭМ за 03 февраля 2011г.

На рисунке 4 приведены графики нагрузок для 3-х режимов работы Нижнекамской ГЭС.

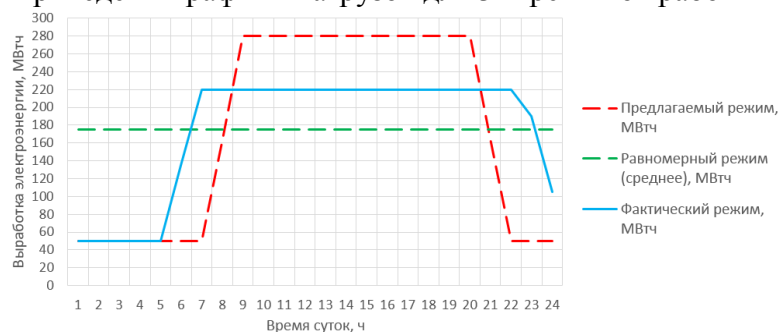


Рисунок 4. Суточная выработка активной электроэнергии за 03 февраля 2011г.

Для оценки влияния изменения характеристики внутрисуточных режимов работы ГЭС в таблице 2 приведены суточные результирующие показатели электростанции на оптовом рынке электроэнергии. Следует указать, что при оптимальном планировании учитывались объемы электроэнергии в рамках обязательств по регулируемым договорам (РД) для населения.

Таблица 2 - Показатели суточных режимов работы Нижнекамской ГЭС

Режим	Суточная выработка, МВт*ч	Р, тыс. руб.
Равномерный	4200	3872
Фактический дифференцированный	4200	4191
Предлагаемый дифференцированный	4200	4318

Таким образом, оптимальным (исходя из критерия) суточным графиком активной нагрузки является предлагаемый дифференцированный, который на 127 тысяч рублей в сутки экономически эффективнее по сравнению с фактическим дифференцированным.

В четвертой главе проведено описание разработанного программного комплекса, который состоит из 2-х модулей: модуль расчета режимов функционирования гидроэнергетического комплекса и модуль расчета краткосрочных режимов работы ГЭС.

Модуль расчета среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетической системы: разработанная в рамках вышеописанной задачи имитационная система характеризуется наличием математического, программного, информационного и технического вида обеспечения.

На рисунке 5 представлена структура разработанного программного комплекса «Энергетическая система каскада ГЭС» и графический интерфейс индивидуальной страницы Жигулевской ГЭС ВКК.

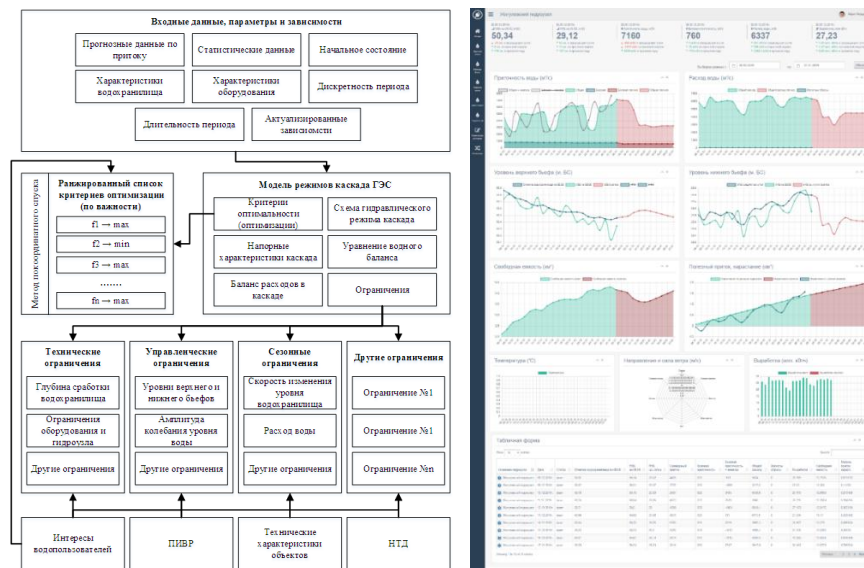


Рисунок 5. Структура программного модуля и графический интерфейс индивидуальной страницы Жигулевской ГЭС ВКК.

Программный комплекс реализован на ASP.NET языке C# с применением технологии MVC. В качестве базы данных используется MSSQL Server, в качестве web сервера IIS (Internet Information Server). Доступ к программному комплексу предоставлен из любого web браузера по адресу <http://hydrocascade.com>

Программный модуль оптимизации краткосрочных режимов работы ГЭС: Программный комплекс оптимизации краткосрочных режимов работы гидроэлектростанции является дополнительным модулем к основному программному решению ПК «Энергетическая система каскада ГЭС».

Для расчета оптимальных краткосрочных режимов гидроэлектростанции требуется импорт данных, в том числе, из систем телеметрии АСУТП гидроэлектростанции. В связи с этим, к основному программному решению были добавлены блоки, отвечающие за следующий функционал: получение данных телеметрии АСУТП станции; обработка данных телеметрии; модель оптимизации краткосрочных режимов; вывод результирующих параметров.

Стоит отметить, что в ПАО «Русгидро» эксплуатируется программный комплекс «Диспетчерский центр», функции которого частично пересекаются с разработанным в рамках данной работы программным решением.

Ключевыми преимуществами разработанного программного комплекса по сравнению с ПК «Диспетчерский центр» являются: повышение точности расчетов за счет непрерывной калибровки характеристик гидроузлов и генерирующего оборудования; возможность применения разработанной методики поиска компромиссных решений при формировании среднесрочных режимов функционирования каскада ГЭС; возможность применения разработанной методики оптимизации краткосрочных режимов функционирования отдельных ГЭС каскада; возможность предоставления доступа к программному комплексу с любого компьютера подключенного к сети интернет при условии прохождения аутентификации; эргономичный графический интерфейс вывода данных.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Главный результат представленной работы заключается в исследовании и разработке методики и алгоритма поиска компромиссных решений при формировании среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетических систем в условиях наличия неопределенного количества требований участников энергетического и водохозяйственного комплексов, а также разработке методики и алгоритма оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

Наряду с этим, в работе решены следующие задачи:

1. Проведен анализ функционирования гидроэнергетической системы с описанием общих принципов функционирования каскада и его влияние на энергетические и водохозяйственные комплексы;

2. Проведен анализ ключевых проблем формирования режимов работы гидроэнергетической системы;

3. Проведен анализ краткосрочных режимов работы ГЭС в условиях функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности;

4. Разработана математическая модель гидроэнергетической системы с описанием структуры функционирования каскада;

5. Разработана методика формирования среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетических систем с учетом компромиссного удовлетворения интересов участников ВХК.

6. Разработана методика и алгоритм прогноза уровня нижнего бьефа гидроузлов на основании непрерывной калибровки существующих характеристик по данным телеметрических измерений. Данная методика позволяет непрерывно уточнять характеристику зависимости уровня нижнего бьефа любого гидроузла.

7. Разработана методика оптимального планирования краткосрочного (суточного) режима работы ГЭС с учетом функционирования ОРЭМ. Методика позволяет максимизировать прибыль собственников ГЭС учитывая существующие ограничения и допущения;

8. Разработан программный комплекс расчета компромиссных решений по формированию среднесрочных режимов функционирования гидроэнергетических систем в условиях наличия неопределенного количества требований участников ВХК (<http://hydrocascade.com>). Программный продукт позволяет с любого компьютера, подключенного к сети internet, осуществлять расчеты режимов функционирования гидроэнергетической системы.

9. Разработан программный модуль оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС с учетом функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности. Программный модуль является дополнительным решением к основному программному комплексу.

10. Разработанный программный комплекс формирования режимов функционирования гидроэнергетических систем используется в АО «Татэнерго» и Министерстве экологии и природных ресурсов Республики Татарстан для подготовки предложений к заседаниям межведомственной рабочей группы по формированию режимов работы ГЭС Волжско-Камского каскада при Федеральном агентстве водных ресурсов (*Акт о внедрении результатов исследования*).

11. Программный продукт показал свою работоспособность и экономическую эффективность. Ежегодный экономический эффект в АО «Татэнерго» составляет ~102,85 млн. рублей (*Акт о внедрении результатов исследования*).

Поставленная цель диссертационной работы достигнута.

Направления дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Прогнозирование полезного притока воды в водохранилища каскада на основе методов машинного обучения.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Мардиханов, А.Х. Моделирование и оптимизация производства электроэнергии на ГЭС / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин // Электрические станции. – 2013г. – № 2(979). – С. 36-40.
2. Мардиханов, А.Х. Организация суточных режимов смешанной энергосистемы ТЭС-ГЭС в условиях свободного планирования нагрузки / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин, А.В. Шарифуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7-8. – С. 47-52.
3. Мардиханов, А.Х. Исследование оптимальных ограничений мощности каскадных ГЭС в условиях оптового рынка электроэнергии / А.Х.Мардиханов // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 3(39). – С. 12-15.
4. Мардиханов, А.Х. Программный комплекс оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 5-6. – С. 114-118.
5. Мардиханов, А.Х. Оптимальное планирование ограничений мощности Нижнекамской ГЭС с учетом действующих и планируемых к изменению регламентов ОРЭМ / А.Х. Мардиханов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2015. – №3(27). – С. 21-31.
6. Мардиханов, А.Х. Математический анализ энергоэффективности эксплуатации трансформаторов в условиях неравномерности их нагрузки / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин, А.В. Шарифуллин // Промышленная энергетика. – 2013. – №11. – С. 11-13.
7. Мардиханов, А.Х. Методика прогноза уровня нижнего бьефа ГЭС в условиях суточного регулирования стока / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин / Гидротехническое строительство. – 2012. – №6. – С. 16-19.
8. Мардиханов, А.Х. Обеспечение интересов ЕЭС России при формировании режимов работы гидроэнергетического комплекса / А.Х. Мардиханов / Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – №2(42). – С. 3-11.

Статья в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

9. Ayrat Mardikhanov and Vilen Sharifullin Search for a compromise between the interests of water users while forming the operating modes of HPP cascade / 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 575 012156.

Монография:

10. Оперативное моделирование и оптимальное планирование краткосрочных режимов гидроэлектростанций / В.Н. Шарифуллин, А.Х. Мардиханов, А.В. Шарифуллин // Монография, ISBN 978-5-89873-445-9, КГЭУ, Казань, 2016.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

11. Программный комплекс оптимального планирования суточной нагрузки ГЭС / А.Х. Мардиханов, В.Н. Шарифуллин // Программа для ЭВМ № 2012613398 Рос. Федерация, дата рег. 11.04.2012.

Подписано в печать 28.06.2019. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 2806/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
