

О Т З Ы В

официального оппонента Хамитова Рустама Нуримановича на диссертационную работу Захарченко Виталия Евгеньевича «**Развитие теоретических основ и реализация автоматизированного управления активной мощностью и составом задействованных агрегатов ГЭС**», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

Представленная на отзыв работа состоит из введения, пяти глав, выводов, и списка литературы; изложена на 288 страницах основного машинописного текста, содержит 108 рисунков, 36 таблиц, 27 иллюстрирующих примеров, 89 формул и включает список источников из 180 наименований.

Целью работы в формулировке автора является развитие теоретических основ и реализация автоматизированного управления активной мощностью и составом задействованных агрегатов для повышения эффективности функционирования ГЭС с учетом планового задания Системного оператора, критериев эффективности и оценки состояния агрегатов.

1. Актуальность темы

В России функционирует более 180 гидроэлектростанций (ГЭС), в том числе: 15 ГЭС мощностью свыше 1000 МВт, 102 ГЭС мощностью свыше 10 МВт, две ГАЭС и др. В 2019 г. суммарно на ГЭС произведено 190,3 млрд. кВт*ч электроэнергии, что составляет 17,6 % всей выработанной электроэнергии в России. В составе отдельной ГЭС может функционировать до 25 гидроагрегатов (ГА). Эффективность работы ГЭС определяется эффективностью работы агрегатов. Крупнейшим энергетическим холдингом России является ПАО «РусГидро», в состав которого входит более 60 ГЭС, производящих 82% электроэнергии всех ГЭС России. Задача повышения степени автоматизации управления и оптимизации режима работы состава агрегатов ГЭС сформулирована в стратегических целях развития ПАО «РусГидро» в 2020 году: необходима «...реализация средств автоматического управления, обеспечивающих учёт ограничений режима работы, оптимизацию режима работы оборудования и его состава, интегрированных с системами диспетчерского и технологического управления». Такие системы обозначаются термином РУСА – рациональное управление составом агрегатов. Очевиден масштаб проблемы повышения эффективности и автоматизации управления агрегатами ГЭС. Значимость работы подтверждается проведением конкурсов на технико-экономическое обоснование систем РУСА (2015, 2016 гг.).

Для эффективной работы ГЭС характерно множество возможных сочетаний состава агрегатов, неполнота их описаний, частичная неопределенность в периодичности включений/отключений агрегатов, режимный динамизм, влияние внешней среды, нелинейности характеристик агрегатов. Задача обоснованного выбора состава работающих агрегатов достаточно сложна. Комбинаторика позволяет оценить количество вариантов состава с работающими ГА. Например, для выбора 10

агрегатов из 24 необходимо проанализировать почти 2 млн. вариантов. При выборе должны быть учтены критерии надёжности, состояния агрегатов, экономической целесообразности, эффективности составов оборудования, ограничения по отклонениям от заданной мощности, обеспечению резервов регулирования на загрузку и разгрузку активной мощности, равномерного распределения износа ресурсов и т.д. Ограничения должны выполняться как в установившемся режиме работы оборудования, так и во время переходных процессов.

Эффективное управление такими сложными объектами может быть обеспечено путем применения уточненного моделирования, улучшенных алгоритмов управления, усовершенствованных систем автоматизированного управления. Задача оптимального управления связана с созданием математического, информационного, алгоритмического обеспечения систем управления технологическими процессами ГЭС, оказывающими значительное влияние на оптимальность выработки электроэнергии, сопровождение и эксплуатацию как основного оборудования, так и вспомогательных систем. Решение должно включать структурные улучшения АСУТП ГЭС, научно-технические исследования, математические и имитационные модели гидроагрегатов и их систем управления, способных в режиме реального времени осуществлять интеллектуальную поддержку принятия решений по управлению технологическими процессами ГЭС с учетом сохранения устойчивости и качества управления в условиях вариации параметров объекта.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что разработка эффективных автоматизированных систем управления агрегатами ГЭС, включающих оптимальное оперативное управление составом агрегатов и распределение активной мощности между агрегатами в перспективе планового задания на ГЭС, представляет актуальную научно-практическую проблему, имеющую важное значение для гидроэнергетики в целом.

2. Оценка содержания диссертационной работы и степени обоснованности научных положений выводов и рекомендаций

В первой главе приведены основные характеристики систем автоматизированного управления гидроагрегатами и систем ГРАМ ГЭС и их взаимодействие, историческая справка о предшествующих вариантах поиска решений рационального управления составом агрегатов ГЭС, сформулирована постановка задачи создания автоматизированной системы РУСА. Соискатель описывает традиционные сложившиеся системы управления АСУТП ГЭС: гидроагрегатов и группового регулирования. Справедливо выявляет узкие места и недостатки в области автоматизации. На основе произведенного обзора литературы и проведенного описания соискатель формулирует постановку цели работы и задачи.

Вторая глава описывает с различных сторон моделирование гидроагрегата: как моделирование статических, условно постоянных характеристик агрегата: эксплуатационной, расходной, - так и динамических – для оценки состояния агрегата на основе значений параметров АСУТП агрегата.

Автор убедительно показывает недостатки традиционных методов описания статических характеристик, основанных на табличном задании и кусочно-линейной аппроксимации и предлагает метод, основанный на оптимальных кубических Эрмитовых сплайнах, коэффициенты которых определяются из решения задачи оп-

тимизации функции кривизны сплайна. Развитие этой идеи и применение суперпозиции пространственных функций масштабирования, смещения, поворота, растяжения по отношению к заданной характеристике позволяет по малому количеству опорных точек реального эксперимента приблизить функцию эффективности агрегата, выданную производителем агрегата при выпуске, к действительной, с учетом характерных изменений, старения, особенностей эксплуатации и т.д.

На основе описания эксплуатационной и расходной характеристик автор формулирует критерий эффективности работы агрегата, выражаемый в потенциальных потерях мощности агрегата от вынужденной работы на неоптимальном КПД при том же объеме расходуемой воды.

Вторая часть второй главы, содержит значительную часть ранее опубликованных автором работ, и описывает функционально ориентированное моделирование состояний агрегатов и оценку здоровья агрегата на основе этой модели. Основной идеей является сравнение интервальных величин значения параметра из АСУТП (с учётом его точности, периода опроса) и модельного интервала, свойственного для данного параметра в данном режиме. Такой интервал назван характерным, в его основе данные истории поведения параметров из АСУТП, экспертные оценки и рекомендации, функциональные зависимости, позволяющие косвенно оценить значения параметров. Полученное по всем параметрам объекта интервальное сравнение, выраженное нечеткой величиной, позволяет сделать заключение о состоянии здоровья, состоянии системы управления и сравнить эти оценки с другими агрегатами для выявления лучшего состава для исполнения задачи.

Третья глава содержит основные теоретические положения по моделированию групповых систем управления активной мощностью, к которым отнесена и вновь создаваемая система автоматизированного РУСА.

Сформулирован критерий повышения эффективности ГЭС, который образуется на основании суммы потенциальных эффектов ГА ГЭС – эта величина характеризует максимальную границу возможной оптимизации ГЭС от системы РУСА. Рекомендации РУСА имеет смысл только тогда, когда изменение состояния ГА приведёт к повышению эффективности ГЭС, этот эффект от выполнения данной рекомендации обозначен как минимальный эффект РУСА. Таким образом, формируется интервальная величина, оценивающая минимальный и максимальный эффект от рекомендации системы РУСА.

Одним из ключевых разделов в главе является содержание моделирования различных функций распределения мощности группового регулятора активной мощности ГЭС и сравнению вновь предлагаемых методов с традиционным.

Значительная часть посвящена описанию оригинальной методики разработки систем управления рационального управления составом агрегатов на основе многокритериальной оптимизации и анализу применения модели РУСА к эмпирическим данным различных ГЭС. Анализ выполнен для 4 ГЭС с разным количеством и типом агрегатов, о чем указано в актах о использовании результатов работ.

В завершении приведено технико-экономическое обоснование внедрения системы, сделанное с существенными допущениями.

Четвертая глава содержит описание алгоритмов и компонентов реализованного прототипа системы рационального управления составом агрегатов, внедрение подкреплено актами, вынесенными в приложение к работе. Внедрение позволило сформировать основные рекомендации по наладке системы и введению ее в работу.

основные теоретические положения по моделированию групповых систем управления активной мощностью, к которым отнесена и вновь создаваемая система автоматизированного РУСА

Пятая глава кратко определяет направления и рекомендации возможных исследований, которые будут полезны для последующего усовершенствования качества управления ГЭС.

3. Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна заключается в развитии теоретических положений определения эталонного состояния гидроагрегатов и ГЭС, включающее оптимизацию описания функций эксплуатационных характеристик агрегатов, усовершенствовании функций распределения активной мощности для систем группового регулирования ГЭС, сформирована методология формализованного описания автоматизированной системы рационального управления составом задействованных агрегатов (РУСА) на основе уточненных моделей структуры, архитектуры состава и функций агрегатов, взаимосвязи компонентов системы. Формализованные методы создания моделей системы РУСА ГЭС в отличие от существующих методов учитывают эффект повышения КПД ГЭС, минимизируют на основе функционально-ориентированных моделей технологического процесса риски нештатных ситуаций ГА, облегченно автоматизируются и адаптируются для конкретной ГЭС.

4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе

Обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений, использованием современных математических моделей и систем программного обеспечения. Достоверность и адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами других авторов, удовлетворительным совпадением результатов аналитических решений с результатами математического моделирования и результатами апробации на реальных данных нескольких ГЭС, внедрением автоматизированной системы РУСА на ГЭС.

5. Значимость для науки и производства полученных результатов

Соискателем показано, что решение научно-практической проблемы развития теоретических основ и реализации автоматизированного управления ГЭС, включающей оптимальное оперативное управление составом агрегатов и распределением активной мощности между агрегатами в перспективе планового задания на ГЭС с учетом масштаба задач, сложности алгоритмов управления, возможности перехода ГА через зоны ограниченной работы, совместной работы агрегатов с различающимися эксплуатационными характеристиками, неполноты описаний агрегатов, частичной неопределенности в периодичности включений/отключений агрегатов, режимного динамизма, влияния внешней среды, нелинейностей характеристик, критериев надёжности и состояния агрегатов, экономической целесообразности, эффективности составов оборудования, ограничений по отклонениям от заданной мощности, обеспечения резервов регулирования на загрузку и разгрузку активной

мощности, равномерного распределения износа ресурсов в установившихся режимах и переходных процессах представляет актуальную задачу, имеющую важное значение для гидроэнергетики. Оптимизация оперативного управления активной мощностью и составом агрегатов ГЭС повышает качество управления ГЭС, каскада ГЭС, создает основу улучшения управления энергосистемой.

Обоснована методология определения эталонного состояния ГА, учитывающая показатель эффективности, основанный на потенциальных потерях выработки ГА от вынужденной работы на неоптимальном КПД по сравнению выработкой на максимальном КПД того же объема воды, и показатели, характеризующие состояние ГА на основе разработанной комплексной функционально-ориентированной модели гидроагрегата, учитывающей основные статические и динамические характеристики. Предложена методика построения модели ГА для оценивания его состояния. Модель основывается на сравнении значений параметров АСУТП ГА с имитированным модельным значением, объединяющим экспертные знания и предысторию функционирования объекта. Имитационная модель, работая в едином времени с системой управления, в каждый момент времени формирует характерные диапазоны изменения параметров. На их основе модель оценивания достоверности формирует признак возможности использования наблюдаемого АСУТП значения в алгоритмах РУСА. Приведены алгоритмы и методики создания моделей, проведена их апробация.

Развиты теоретические положения и определено эталонное состояние ГЭС, основанное на многокритериальной оптимизации по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов ГЭС. Сформулирован оригинальный критерий эффективности ГЭС, в основе которого использована сумма потенциальных потерь выработки агрегатов. Созданы модели систем группового регулирования активной мощности ГЭС, предложено изменение функций распределения мощности системы ГРАМ для повышения эффективности ГЭС. Проведена апробация системы ГРАМ с функцией долевого равенства отклонений от максимального КПД ГА.

Предложена методология формализованного описания автоматизированной системы РУСА на основе уточненных моделей структуры, архитектуры состава и функций агрегатов, взаимосвязи компонентов системы. Формализованные методы создания моделей системы РУСА ГЭС, в отличие от существующих методов, учитывают эффект повышения КПД ГЭС, минимизируют на основе функционально-ориентированных моделей технологического процесса риски нештатных ситуаций ГА, облегченно автоматизируются и адаптируются для конкретной ГЭС.

Разработана концепция интегрированного управления агрегатами ГЭС по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов, включающая методики и алгоритмы оптимизации состава агрегатов, сотрудничающая согласовано с системой ГРАМ и способная в режиме реального времени выдавать рекомендации оператору (как совет) или автоматически в систему группового регулирования мощности (как сигналы управления). Рекомендации формируются на основании критериев эффективности ГЭС и оценок текущего состояния ГА. Оценено время реакции РУСА: не требуется формировать рекомендации по изменению состава чаще чем раз в минуту. Проведена апробация модели РУСА на данных четырех реальных ГЭС за значительный период времени. Созданы модели 4 ГЭС с общим числом агрегатов 56 с различными типами эксплуатационных и расходных характеристик. Предложенная методика представляет интервальную оценку от минимального од-

нократного изменения состава агрегатов до максимально достижимого повышения КПД ГЭС. Показано, что модели и методика адекватны реальным системам. Описано влияние задержки принятия решения об изменении состава агрегата на эффективность ГЭС. Предложен адаптивный алгоритм выбора задержки принятия решения.

Разработана методика экономического обоснования и исследования экономической эффективности автоматизированной системы рационального управления составом агрегатов. Поведён расчёт для четырёх ГЭС на основе данных реальных АСУТП ГЭС за год. Полученные результаты свидетельствуют, что для ГЭС из 24 агрегатов ежегодный эффект достигает 51 млн. руб., для ГЭС из 8 агрегатов – 62 млн. руб., для ГЭС из 20 агрегатов – 50,6 млн. руб., для ГЭС из 6 агрегатов – 27 млн. руб. Оценки проведены при разной выдержке принятия решения, полученной на основе данных о длительности актуальности рекомендации из моделей РУСА. Отмечено, что при увеличении выдержки принятия решения, экономический эффект от РУСА уменьшается. Кроме достижения экономического эффекта от работы всех агрегатов на максимальном КПД в функции системы РУСА заложена ротация основного оборудования, учет состояния и тенденций изменения параметров гидроагрегатов (температуры, вибрации), эффект от которых в настоящий момент сложно оценить количественно.

Сформулированы основные требования к системам оптимизации состава агрегатов, определена архитектура конкретных систем, разработаны компоненты систем и определена их функциональность, описана схема потоков данных между компонентами. Разработана действующая система автоматизированного рационального управления составом агрегатов, описан интерфейс пользователя, основная мнемосхема системы, параметры системы. Обозначено решение проблемы конкуренции критериев. Проведено сравнение с аналогами. Система имеет реальное внедрение с 2018 г. и позволяет: сформировать меру эффективной работы станции; повысить эффективность использования основного оборудования; равномерно распределить нагрузку среди основного оборудования и число включений и отключений агрегатов за заданный период времени; заблаговременно определить риски развития нештатных ситуаций на агрегатах; проводить обучение оперативного персонала на модели; подготовить основание для дальнейшей оптимизации производства (основного и вспомогательного оборудования).

Определены перспективные направления развития научных исследований в области автоматизированного управления ГЭС. Предложенные методики автоматизации, модели и алгоритмы управления могут быть использованы в других отраслях промышленности.

Степень решения поставленных задач и уровень полученных результатов в развитии теоретических основ и реализации автоматизированного управления активной мощностью и составом агрегатов ГЭС в целях повышения качества управления и эффективности ГЭС свидетельствуют о достижении цели диссертационной работы.

6. Замечания по диссертационной работе

1. В основе работы используется известный принцип расчета потенциальных потерь, однако не всегда воду напорного водохранилища можно использовать для

выработки электроэнергии с максимальным эффектом, т.к. эта возможность зависит от таких факторов, как водные режимы, мощности потребителей и др. Нечетко указана взаимосвязь максимального объема выработки электроэнергии со всеми указанными факторами, в том числе при их различных сочетаниях в условиях вариации параметров.

2. Вследствие более эффективной работы гидроагрегаты ГЭС будут снижать удельный расход воды, при этом постепенно увеличивается уровень напорного водохранилища, уменьшается напор для ГЭС, расположенных выше по каскаду. Следовало бы привести оценки изменения указанных параметров для режима эффективной работы гидроагрегаты ГЭС.

3. В экономическом обосновании стоимость оценки потенциальных потерь взята по цене «рынка на сутки вперед» без учета понижающего коэффициента, что требует своего обоснования.

4. В работе не приведены реальные оценки стоимости «изменения состава агрегатов», не оценена стоимость пуско-остановочных процессов агрегатов ГЭС, как в плане организационных, так и материальных затрат.

5. В работе присутствуют стилистические ошибки, опечатки, что не влияет на понимание содержания работы.

7. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

По теме диссертации автором опубликовано 35 печатных изданиях, среди которых 13 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 11 из них рекомендованы ВАК по специальности, 5 публикаций, индексированных в международных базах цитирования Scopus и WoS, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 9 учебных пособий. По результатам исследований опубликована 1 монография.

Автореферат диссертации выдержан по форме и объему, и отражает основное содержание и положения диссертационной работы.

Общее заключение по работе

В целом, по мнению оппонента, диссертационная работа удовлетворяет пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. в редакции от 20.03.2021 г. №426, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Проведенное исследование содержит новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие гидроэнергетики страны. Диссертация Захарченко Виталия Евгеньевича по теме «Развитие теоретических основ и реализация автоматизированного управления активной мощностью и составом задействованных агрегатов ГЭС» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной с использованием компьютерного моделирования, и экспериментальных алгоритмов, обеспечивающих развитие теоретических основ и реализующие автоматизированное управление активной мощностью и составом агрегатов ГЭС.

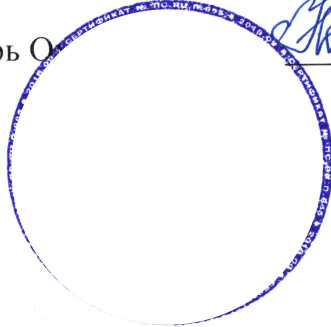
Считаю, что соискатель Захарченко Виталий Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)».

Официальный оппонент
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет»,
профессор кафедры электрической
техники
тел. (3812) 65-31-65,
e-mail: apple_27@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович

Подпись профессора Хамитова Р.Н. заверяю:

Ученый секретарь О



А. Немцова

Немцова Анна Федоровна

22.09.2021