

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. Директора

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

«Институт проблем управления

им. В. А. Трапезникова

Российской академии наук»

доктор технических наук

профессор РАН

  
Губко М.В.

27.09.2021 г.

### **О Т З Ы В**

ведущей организации о диссертации 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)»

#### **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.).

Система управления составом агрегатов ГЭС призвана, не нарушая течения технологического процесса и обеспечивая требуемую выработку электроэнергии заданного качества с учетом планового задания Системного оператора (СО), проанализировать состояние оборудования работающего состава ГА и ГА резерва и

определить, какие из них могут наиболее эффективно выполнить задачу. Эффективность ГА непосредственно связана с функцией распределения активной мощности, которая влияет на скорость отработки задания ГЭС, учета возможности перехода ГА через зоны ограниченной работы, сложностью алгоритмов и масштабом задачи, возможностью работы ГА с различающимися эксплуатационными характеристиками.

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 является достаточно сложной. Комбинаторная оценка количества вариантов состава с работающими ГА следующая: 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.

Актуальность оптимального оперативного управления активной мощностью и составом агрегатов ГЭС обусловлена усложнением систем управления, возрастанием количества возлагающихся на них функций, необходимостью централизации функций управления в единую систему, обеспечивающую повышение качества и эффективности как отдельных элементов, так и системы в целом. Оптимизация оперативного управления активной мощностью и составом агрегатов повышает качество управления ГЭС, а также каскада из нескольких ГЭС, создает основу улучшения управления энергосистемой страны.

Эффективное управление такими сложными объектами может быть обеспечено на основе применения современных методов 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.

## **Цель работы**

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.

## **Значимость для науки и производства полученных автором результатов**

Ценность научных работ соискателя заключается в следующем.

В диссертационной работе 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, сложной динамики режимов, 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 и каскада ГЭС, создает основу повышения эффективности управления энергосистемой.

В работе предложена и обоснована методология определения эталонного состояния ГА, учитывающая значение показателя эффективности, отражающего потенциальные потери выработки ГА от вынужденной работы на неоптимальном КПД, по сравнению выработкой на максимальном КПД того же объема воды, а также значения показателей, характеризующих состояние ГА на основе разработанной комплексной функционально-ориентированной модели гидроагрегата, учитывающей основные статические и динамические характеристики.

Предложен метод разработки модели ГА для оценивания его состояния. Модель осуществляет в реальном времени сравнение значений параметров АСУТП ГА с имитированным модельным значением, объединяющим экспертные знания и предысторию функционирования объекта. Имитационная модель, синхронно с функционированием системы управления, в реальном времени формирует характерные диапазоны изменения параметров. На их основе предложенная автором модель оценивания достоверности формирует признак возможности использования в алгоритмах РУСА наблюдаемого АСУТП значения. Разработаны алгоритмы и методики создания моделей, проведена их апробация.

Разработаны методы определения эталонного состояния ГЭС, основанные на многокритериальной оптимизации по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов ГЭС. Сформулирован оригинальный критерий оценки эффективности работы 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.

Разработана концепция интегрированного управления агрегатами ГЭС по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов, включающая методики и алгоритмы оптимизации состава агрегатов, осуществляемого согласованно с системой ГРАМ. Предусмотрено в режиме реального времени выдавать рекомендации оператору (режим советчика) либо – автоматически передавать сигналы управления в систему группового регулирования мощности. Рекомендации формируются на основании критериев эффективности ГЭС и оценок текущего состояния ГА. Оценено время реакции РУСА: установлено, что 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 четырёх ГЭС с общим числом агрегатов 56 с различными типами эксплуатационных и расходных характеристик. Предложенная методика представляет интервальную оценку: от минимального (однократного) изменения состава агрегатов до – гарантирующего максимально достижимое повышение КПД ГЭС. Обоснована адекватность моделей и методов 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. 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 оператив-

ного 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.

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Рекомендуется продолжить внедрение автоматизированных систем управления активной мощностью и составом задействованных агрегатов на ГЭС работ, на основе полученного опыта оценить возможность перевода системы в автоматический режим управления.

Рекомендуется продолжить исследование по обозначенным в работе перспективным направлениям, в особенности: оптимизации функций распределения; учету реактивной мощности; оптимизации числа изменений агрегатов ГЭС. Оценку состояния агрегата дополнить данными специализированных систем диагностики вибрационной диагностики, температурного контроля и т.д., например: механический небаланс ротора ГГ; механический небаланс РК гидротурбины; дефекты линии вала ГА; неперпендикулярность зеркальной поверхности диска подпятника оси вала ГА; волнистость зеркальной поверхности диска подпятника; гидравлический небаланс РК; ухудшение состояния проточной части турбины (повреждение облицовки камеры РК и сопрягающего пояса с конусом отсасывающей трубы ПЛ турбины); неравномерный подвод воды к РК; нарушение комбинаторной зависимости для ПЛ турбины; образование и срыв центрального вихревого жгута; работа турбины в зонах с повышенной кавитацией; электрический небаланс или искажение формы ротора ГГ, наличие витковых замыканий полюсов; ослабления уплотнения стыков статора ГГ. Периодическая составляющая магнитного тяжения с частотой 100 Гц; ослабление крепления верхней крестовины; повреждение опорных элементов сегментов генераторного подшипника; ослабление крепления корпуса турбинного подшипника; повреждение опорных элементов сегментов турбинного подшипника (для сегментного подшипника); разрегулировка зазоров в генераторном подшипнике; разрегулировка зазоров в турбинном подшипнике и другие.

### **Научная новизна**

1. Предложена и обоснована методология определения эталонного состояния ГА на основе разработанной уточненной математической модели гидроагрегата, учитывающей основные статические характеристики и динамические параметры, зависящие от режима работы и течения техпроцесса, критериев эффективности и оценок состояния. Разработанные модели и методы идентификации производственных процессов гидроагрегатов на основе оптимального кубического Эрмитова сплайна, в отличие от традиционных подходов, позволяют исследовать измене-

ния технологической функции ГА за продолжительный период времени и восстанавливать функции ГА по малому числу наблюдений.

2. Предложены методы определения эталонного состояния ГЭС на основе анализа разработанной модели системы группового регулирования активной мощностью (ГРАМ) ГЭС, отличающейся усовершенствованной процедурой оптимизации функции распределения мощности системы, моделирования состояния ГЭС с учетом состояния агрегатов и использованием многокритериальной оптимизации.

3. 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.

4. Разработана концепция интегрированного управления агрегатами ГЭС по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов, включающая: методики и алгоритмы структурной оптимизации состава агрегатов, формирование рекомендаций достижения эталонного состояния ГЭС с учетом функциональных ограничений, модель системы РУСА, оценку времени реакции РУСА, обобщение результатов апробации модели РУСА реальных ГЭС за продолжительный период времени, оценку длительности актуальности рекомендаций. Разработанные алгоритмы управления обеспечивают повышение интеллектуализации решений и, в целом, повышают эффективность ГЭС. Предложенные алгоритмы распределения мощности системы ГРАМ, в отличие от применяемых, позволяют унифицировать алгоритмы для ГА с отличающимися эксплуатационными характеристиками, в том числе и с несколькими зонами работы (с зонами ограниченной и запрещенной работы).

### **Обоснованность и достоверность результатов работы**

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими выкладками и экспериментальными данными, полученными в работе, и не противоречат известным положениям в области технических наук. Достоверность обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием обоснованных и признанных допущений, использованием современных методов разработки 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.

### **Практическая ценность**

Практическая значимость развитых в диссертации моделей и методик, полученных результатов, выводов и рекомендаций для автоматизированного интегрированного управления агрегатами ГЭС по критериям эффективности и оценки состояния агрегатов заключается в формализации процессов проектирования, разработки и автоматизации нового класса систем управления, способных в реальном

времени оптимизировать состав агрегатов ГЭС, планировать и выполнять пуск, останов, смену зоны работы агрегатов с учетом состояния агрегатов и их эффективности в перспективе задания по генерации от СО. Предложенный программный комплекс автоматизирует существенную часть функций оперативного персонала ГЭС, служит платформой для обучения оперативного персонала.

Предложенные методы описания основных характеристик ГА формализованы и способны без сложных технических и организационных процедур восстанавливать и уточнять характеристики ГА по малому числу наблюдений.

Разработанные функции автоматизированного распределения мощности системы ГРАМ не вызывают изменения состава оборудования, соответственно, не расходуют его ресурс, не требуют внедрения новой системы управления, как в случае применения обычной системы РУСА, но позволяют добиваться повышения эффективности работы ГЭС. Сочетание подходов системы РУСА и оптимизации функции распределения мощности системы ГРАМ позволяют существенно повысить эффективность автоматизированного управления ГЭС.

Практическая значимость результатов исследований, выводов и рекомендаций подчеркивается значимым экономическим эффектом от создания автоматизированной системы РУСА, который ежегодно измеряется десятками миллионов рублей для каждой ГЭС и должен быть использован СО при составлении плановых диспетчерских графиков. Реализация автоматизированной системы РУСА позволяет сформулировать меру энергоэффективной работы ГЭС, повысить эффективность использования и равномерно распределять нагрузку (в том числе число включений и отключений) среди основного оборудования в заданный период времени, заблаговременно определять риски развития нештатных ситуаций на ГА, проводить обучение оперативного персонала на модели. Использование системы РУСА, разработанных моделей и методов на производственных объектах подтверждено актами.

Предложенные методы могут быть применены с адаптацией для оптимизации состава оборудования вспомогательного производства ГЭС, а также для оптимизации производственных процессов в других отраслях промышленности.

### **Замечания по работе**

Представленный метод восстановления эксплуатационной характеристики по малому числу наблюдений нуждается в подтверждении реальным экспериментом.

Формула потенциальных потерь (46), принятая автором, образует достаточно широкий диапазон эффективной работы агрегата (см. рис. 18). Однако в дальнейшем автору рекомендуется исследовать возможности по сокращению диапазона эффективной работы гидроагрегата.

Алгоритмы автоматизации и моделирования (2.5.8, 3.2.4, 3.4.1, 3.4.2.5, 4.1.4) не представлены в формализованном виде, а описаны естественным языком, что допускает возможность неоднозначного трактования.

Также в работе присутствует незначительное число орфографических, синтаксических и пунктуационных ошибок, что не влияет на положительное заключение.

### **Заключение по работе**

Диссертация «Развитие теоретических основ и реализация автоматизированного управления активной мощностью и составом задействованных агрегатов ГЭС» Захарченко Виталия Евгеньевича является законченной научной работой, соответствующей требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в ре-

дакции от 20.03.2021г, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых носит значительный вклад в развитие энергетики. Соискатель Захарченко Виталий Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»

Диссертационная работа рассмотрена на семинаре лаборатории 41 «Идентификации систем управления» Федерального бюджетного учреждения науки Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН от 27 сентября 2021г., Протокол №1.

Отзыв составлен:

Г.н.с, д.т.н.,  
профессор,  
+7(916)5442259,  
e-mail: [sung7@yandex.ru](mailto:sung7@yandex.ru)



**Бахтадзе Наталья Николаевна**



*Бахтадзе НН*  
ЗАВЕРЯЮ  
ПЕР  
ВАН. *С*

Федеральное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН» (ИПУ РАН)  
Россия, 117997, Москва  
ул. Профсоюзная, д. 65  
E-mail: [dan@ipu.ru](mailto:dan@ipu.ru)