

На правах рукописи



МИТРОФАНОВ Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА
ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА
АГРЕГАТОВ ГЭС**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Секретарев Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Пантелеев Василий Иванович**
доктор технических наук, профессор
Сибирский Федеральный
университет, профессор кафедры
«электротехнические комплексы и
системы», г. Красноярск;

Диденко Сергей Александрович
кандидат технических наук,
АНО ВПО «Новый сибирский институт»,
доцент кафедры математики и
информатики, г. Новосибирск.

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, г. Томск.

Защита состоится «24» апреля 2014 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «28» февраля 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Тимофеев И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гидроэлектростанции (ГЭС) являются важным элементом энергосистемы. Благодаря своей высокой маневренности и возможности работать в пиках графиков нагрузки ГЭС способны брать на себя задачи обеспечения нагрузочного резерва и быстро реагировать на внезапное изменение потребления мощности в энергосистеме, что в значительной мере повышает надежность электроснабжения. Наличие в энергосистеме гидроэлектростанций позволяет сократить пережог газа и твердого топлива на тепловых станциях. Кроме того, гидроэлектростанции на сегодняшний день являются единственным источником возобновляемой энергии, который способен вырабатывать электроэнергию в промышленных масштабах.

Работа ГЭС в пиковой и полупиковой части графика нагрузки приводит к частой смене ситуаций на станции и необходимости постоянной адаптации эксплуатационного режима под новые условия. При этом поиск оптимальных вариантов управления сопряжен с учётом большого количества факторов, таких как эксплуатационная надежность, экономичность, качество электроэнергии, требования энергосистемы и т.д., что значительно осложняет условия поиска. От качества решения данной задачи зависит эффективность работы ГЭС. Поэтому вопросам управления режимами гидроэлектростанций уделяется большое внимание.

Различные способы и средства управления основным оборудованием гидроагрегатов (ГА), а также управление режимами работы гидроэлектростанций рассмотрены в работах Л.А. Владиславлева, Федоров М.П., В.М. Горнштейна, В.Г. Журавлева, М.Д. Кучкина, В.И. Обрезкова, Ю.А. Секретарева, В.С. Серкова, М.Г. Тягунова, В.А. Тиме, Т.А. Филипповой, Е.В. Цветкова и др. Исследования в области совершенствования контроля и систем управления основным оборудованием и режимами работы гидроэлектростанций продолжаются и в настоящее время.

Одной из актуальных проблем управления на сегодняшний день остаётся задача выбора рационального числа и состава гидроагрегатов на станции и распределение нагрузки между ними.

Как показывают исследования, выбор оптимального состава агрегатов может повысить КПД станции на 3-5%, что является довольно большой цифрой и может привести к существенному повышению выработки электроэнергии на ГЭС.

Еще в начале 70-х годов задачам оптимизации режима работы гидроагрегатов ГЭС уделялось немало внимания среди разработчиков автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). В результате в НЭТИ (НГТУ) была разработана подсистема рационального управления составом агрегатов (РУСА).

В реализации подсистемы РУСА широкое распространение получили методы однокритериальной оптимизации. Их использование предусматривало необходимость предоставления исходных данных для расчета в детерминированном виде, что требовало упрощения математических моделей и

ставило под сомнение корректность принимаемых решений. Применение таких алгоритмов возможно лишь для ограниченного набора режимов.

Более гибкое управление режимами возможно при выборе состава гидроагрегатов ГЭС начальником смены станции (лицом, принимающим решение, ЛПР) в контуре оперативного управления, что в настоящее время и осуществляется на большинстве гидроэлектростанций. Однако такой способ порождает ряд новых проблем. ЛПР должен анализировать большое количество информации и принимать решение по определенному кругу вопросов, так как управление ведется в изменяющихся условиях работы. Поэтому, как правило, принятое решение является субъективным и опирается на опыт и интуицию ЛПР. При этом вследствие цейтнота, большого объема поступающей информации или субъективных причин личного характера ЛПР не всегда может принять наилучшее из возможных решений, что приводит к снижению уровня надежности и экономичности работающего оборудования, а в некоторых случаях, к серьёзной аварии.

Для снижения негативного влияния данных факторов весьма полезным может стать применение ситуационного подхода к управлению. Его применение позволяет в режиме реального времени реагировать на изменения в режиме работы станции, решать задачи в условиях многокритериальности управления, а также обрабатывать информацию, поступающую в детерминированном, вероятностном и неопределённом виде.

Принципы ситуационного управления могут быть использованы для создания подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения (ИНПОР).

Цель данной подсистемы расширить возможности существующей подсистемы РУСА, осуществляя поиск вариантов управления на основе многокритериальной оптимизации и поиска компромиссных решений, что позволит существенно повысить эффективность управления режимами агрегатов ГЭС.

Использование подсистемы ИНПОР в режиме «советчика» позволит не исключать ЛПР из контура управления, что даст возможность использования при принятии решения в нестандартной ситуации его интуиции и опыта, а также учёта факторов, не поддающихся формализации, однако снизит давление субъективных факторов и даст точное математическое основание для принятия какого-либо решения.

Целью работы является разработка моделей управления работающих на станции гидроагрегатов на основе критериев их эксплуатационной надежности и экономичности с учётом индивидуальных особенностей управления гидроагрегатами ГЭС, а также разработка принципов построения подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений оперативного персонала станции.

Для достижения данной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие системы управления составом гидроагрегатов на станции, а также методы оптимизации, которые реализуются и могут быть реализованы в рамках данных систем.
2. Разработать модели формирования обобщенного критерия эксплуатационной надежности на основе параметров эксплуатационного состояния гидроагрегата, блочного трансформатора, а также проточного тракта.
3. Разработать модель критерия экономичности режима работы гидроагрегатов, выраженного в виде нечёткого множества.
4. Разработать математические модели формализованных стратегий управления на основе критериев эксплуатационной надежности и экономичности, а также разработать модели формирования управляющих воздействий на основе выбранных стратегий с учетом оценок состояния указанных критериев.
5. Разработать пакет программ для реализации представленной методики управления составом гидроагрегатов в рамках подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений.

Объект исследования. Подсистема управления составом гидроагрегатов АСУ ТП ГЭС.

Предмет исследования. Принципы реализации системы поддержки принятия решений в рамках контура оперативного управления, а также модели оценки эксплуатационной надёжности и экономичности работы гидроагрегатов и разработка на их основе многокритериальной модели управления.

Методы исследования. Решение поставленных в работе задач базируется на положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как теория многокритериальной оптимизации, теория вероятностей и математическая статистика, теория надежности, математическое моделирование, теория автоматизированного управления, теория нечетких множеств и теория возможностей.

Научная новизна.

1. Проведен анализ стратегий управления составом агрегатов ГЭС, который показал необходимость реализации управления на основе многокритериального подхода путем формирования компромисса между этими критериями.
2. Разработана модель формирования обобщенного критерия эксплуатационной надежности на основании параметров гидротурбины, генератора, силового трансформатор и проточного тракта с помощью теории нечетких множеств.
3. Предложена модель формирования критерия экономичности режима работы гидроагрегатов на основании энергетических характеристик с помощью теории нечетких множеств.
4. Разработаны математические модели для идентификации целей оперативного управления гидроагрегатами, позволяющие производить свёртку критериев на основе компромисса.

5. Разработана ситуационная модель формирования управляющих воздействий на основе выбранных стратегий с учетом двух указанных выше критериев.

6. Сформированы основные принципы построения подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения при оперативном управлении гидроагрегатами с учетом их эксплуатационного состояния и экономичности режима работы.

Практическая ценность.

1. Значения обобщенных критериев эксплуатационной надежности и экономичности всех гидроагрегатов имеют одинаковую размерность и позволяют оперативному персоналу отслеживать изменения состояния гидроагрегатов и принимать решения в контуре превентивного управления до наступления значительного ухудшения режима работы станции.

2. Представленная методика идентификации стратегий управления позволяет быстро и легко определить приоритет рассматриваемых критериев по отношению друг к другу для поиска оптимальных решений, соответствующих целям управления на конкретной ГЭС.

3. Модель формирования управляющих воздействий позволяет определять номера гидроагрегатов, эксплуатация которых наиболее или наименее целесообразна при изменении ситуации на станции и предоставить возможные варианты состава гидроагрегатов для принятия решения ЛПР.

4. Разработанные модели были реализованы для контроля параметров эксплуатационного состояния и экономичности Саяно-Шушенской ГЭС. Результаты могут быть использованы в качестве фундамента для информационной базы данных подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений ЛПР в задачах управления режимами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модель формирования обобщенного критерия эксплуатационной надежности на основании параметров гидроагрегата, силового трансформатора и проточного тракта.

2. Модель формирования критерия экономичности режима работы гидроагрегатов, выраженного в нечетком виде.

3. Методика идентификации стратегий управления гидроагрегатами станции на основе критериев эксплуатационной надежности и экономичности.

4. Модель формирования управляющих воздействий на основе выбранных стратегий с учетом критериев эксплуатационной надежности и экономичности.

Достоверность результатов. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы приведенными теоретическими положениями, данными, полученными при проведении процедуры идентификации стратегий управления среди оперативного персонала Саяно-Шушенской ГЭС, подтверждающими необходимость учёта в различной степени нескольких критериев при реализации управления.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры, на

всероссийской научной конференции молодых ученых "Наука, технологии, инновации" в 2012 и 2013 гг. в г. Новосибирске, на конференции "Современные техника и технологии" (ТПУ, г.Томск, 2012 и 2013 гг.), на Днях Науки НГТУ в 2012, 2013 гг., «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (ТПУ, г.Томск, 2011 г.), IFOST- 2013 и др. Предложенный методический подход использован в учебном процессе: введен в качестве самостоятельного раздела в курс "Выбор и принятие решений", «Гидроэнергетика»; в бакалаврских работах по направлению 140400.62 и магистерских диссертациях по направлению 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника», что подтверждается актом о внедрении.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 научных статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ; 8 – статей в материалах международных и всероссийских научных конференций.

Объём и содержание работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 173 страницах, содержит 56 рисунков и 19 таблиц. Список использованных источников содержит 66 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, аннотируются основные положения работы.

В **первой главе** рассмотрены основные принципы управления внутростанционными режимами работы гидроэлектростанций. Представлена классификация режимов работы и рассмотрены средства управления режимами.

Одним из основных средств управления режимами работы оборудования ГЭС является АСУ ТП. В работе рассмотрена структура данной системы и определены основные принципы управления на различных уровнях в пространственной (взаимодействие между ГЭС и энергосистемой) и временной иерархии.

В ходе анализа выявлено, что АСУ ТП не может полностью осуществлять автоматическое управление всеми режимными задачами станции. В связи с этим обязательным элементом оперативного управления является человек, что обусловлено не только необходимостью контроля работы технологической и режимной автоматики со стороны оперативного персонала, но и наличием слабоструктурированных задач в контуре оперативного управления, которые не могут быть переведены в режим автоматического управления.

Наличие диспетчерского управления в контуре управления ГЭС позволяет говорить о ней как о слабоструктурированном объекте.

Это приводит к появлению ряда факторов, осложняющих реализацию данного подхода.

Таковыми факторами являются, в частности [13]:

1. Многоцелевой характер управления, обусловленный большим количеством критериев, как правило, противоречивых;
2. Динамичность процессов, протекающих на ГЭС. Она определяет постоянное изменение текущих ситуаций, что требует адекватной реакции систем управления;
3. Неполнота информационного описания, её расплывчатость, а также присутствие субъективной интерпретации этой информации ЛПР.

Также не следует забывать, что само присутствие в контуре управления человека (ЛПР) вносит еще как минимум 3 фактора:

1. Постоянное присутствие «цейтнота» у ЛПР для принятия решения;
2. Не коллективная, а личная ответственность ЛПР за принятое решение;
3. Высокая как материальная, так и социальная плата за необоснованно принятое решение.

Всё это приводит к тому, что в условия ограниченного времени на принятие решения возрастает вероятность ошибочных действий со стороны оперативного персонала, что может закончиться принятием неэффективного, или даже опасного для нормальной эксплуатации станции, решения [4].

Одним из вариантов повышения эффективности принимаемых персоналом решений и сокращения времени на поиск оптимальных решений в данных условиях может стать реализация подсистемы ИНПОР на основе ситуационного подхода к управлению.

В общем виде ситуационный подход к управлению может быть представлен следующим выражением:

$$S_t: C_t \xrightarrow{u} C_{t+1}, \quad (1)$$

где C_t – совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени, S_t – совокупность текущих ситуаций, знаний о самой системе управления объектом и о технологических особенностях процесса управления.

Смысл этого соотношения заключается в следующем. Если на объекте управления сложилась текущая ситуация C_t и состояние системы управления и технологические принципы управления, определяемые S_t , допускают использование управляющего воздействия U_k (одношаговое решение), то оно используется и текущая ситуация C_t превращается в C_{t+1} .

Изменение режима на станции сводится к двум видам управляющих воздействий:

1. Изменения состава работающего оборудования на станции;
2. Изменения степени загрузки основного силового оборудования.

Решению задачи выбора оптимального состава гидроагрегатов в рамках подсистемы ИНПОР и посвящена данная работа.

В главе рассмотрены основные этапы развития систем управления составом гидроагрегатов. В частности, рассмотрены такие системы как автооператор и подсистема РУСА, представлены основные достоинства и недостатки данных систем.

Предложена модель управления на основе ситуационного подхода, предусматривающая наличие как минимум двух критериев управления составом гидроагрегатов ГЭС:

$$U^* = DE_1(DE_2(KS_t^a, KS_t^h)KS_t), \quad (2)$$

Где S_t - текущая ситуация на станции, сформулированная в виде требований, которые предъявляются к работе электростанции по условиям покрытия активной и реактивной нагрузок; S_t^a, S_t^h текущие ситуации, связанные с фактическим режимом станции, которые определяются экономичностью и надежностью работающего на ней оборудования; U^* - вектор многоцелевого управления; DE_1 – свёртка, описывающая двухцелевое управление составом агрегатов на станционном уровне с учётом ограничений, накладываемых системой, DE_2 – свёртка, описывающая формирование единого критерия управления гидроагрегатом на основе двух критериев. Свёртки DE_1 и DE_2 в (2) в общем случае могут быть различными. Следует отметить, что под свёрткой критериев понимается компромиссное решение при многоцелевом управлении[6].

Введение системы ИНПОР в контур оперативного управления не является альтернативой существующей системы РУСА. Она дополняет систему и выступает в роли «Советчика» для оперативного персонала станции в решении слабоструктурированных задач, которые не могут быть решены в контуре автоматического регулирования.

Таким образом, представляется возможным повысить эффективность выбора и принятия решений, осуществляемого ЛПР, с помощью введения в контур управления системы интеллектуальной поддержки принятия решений.

Во **второй главе** произведён анализ методов оптимизации состава гидроагрегатов ГЭС.

Средства управления режимами работы гидроагрегатов, такие как подсистема РУСА, довольно часто являются очень мощным вычислительным инструментами. Однако эффективность работы данных подсистем в первую очередь зависит от метода оптимизации, заложенного в них для решения данных задач.

Для задач оптимизации числа и состава агрегатов ГЭС необходимо использование методов дискретного (целочисленного) программирования.

В зависимости от целей (критериев) управления оптимизация может осуществляться либо комбинаторными методами (направленный перебор вариантов, метод ветвей и границ и т.д.) когда поиск осуществляется по одному доминирующему критерию, либо методами, основанными на поиске компромисса между несколькими критериями (рисунок 1).

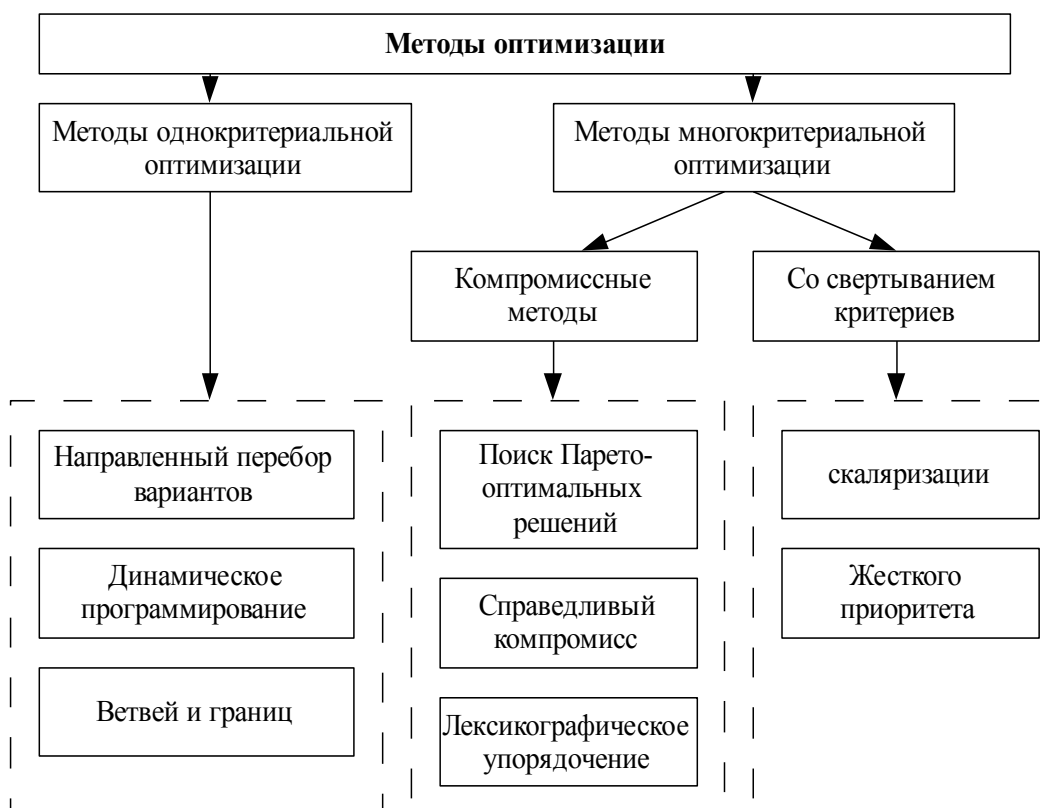


Рисунок 1 - Методы оптимизации состава гидроагрегатов ГЭС

Методы многокритериальной оптимизации являются наиболее актуальными в тех задачах, где присутствует влияние субъективных факторов при принятии решения и стоит задача выбора из нескольких возможных альтернатив.

Применительно к задаче управления, сформулированной в первой главе, наиболее рациональным является использование различных методов оптимизации в зависимости от состояния оборудования на станции.

Методы однокритериальной оптимизации могут быть использованы в ситуациях, когда эксплуатационное состояние гидроагрегатов в пределах нормы и не выходит за границы нормальных параметров. В этом случае выбор состава агрегатов может осуществляться по одному из комбинаторных методов. Однако нарушение эксплуатационного состояния хотя бы одного гидроагрегата на станции требует рассмотрения задачи оптимизации как двухкритериальной и использования методов поиска компромисса между имеющимися критериями[9].

В **третьей главе** подробно рассматривается процесс формирования критериев эксплуатационной надежности и экономичности режима работы гидроагрегатов.

Основными недостатками почти всех описанных методов являются необходимость в проведении сложного экспертного анализа, позволяющего получить условно-количественные оценки в рамках определённой ситуации. Кроме того, сравнение критериев требует приведение их к единым единицам измерения, что также представляет существенную трудность.

Для решения этих задач может быть использован более универсальный подход - теория возможностей. Данная теория была разработана Д. Дюбуа и А.

Прадом во второй половине XX века на основе теории нечетких множеств Л. Заде.

Критерий эксплуатационной надежности ГА

Параметры, по которым осуществляется контроль эксплуатационного состояния гидроагрегата, весьма многочисленны и имеют различную размерность, а также различные диапазоны измерений.

Получение обобщенного критерия эксплуатационной надежности опирается на рассмотренную ранее в работах Секретарёва Ю.А. и Жданович А.А. методику формирования результирующих оценок состояния каждого параметра, представленных в виде значений функций принадлежности.

Данная методика была дополнена следующими моделями:

1. Учёт эксплуатационного состояния только турбины генератора и блочного трансформатора для высоконапорных ГЭС является неполным без оценки состояния его проточного тракта.

В качестве основных параметров, по которым ведётся контроль эксплуатационного состояния, рассматриваются механические напряжения на участках проточного тракта, а именно в водоводе, анкерных опорах и спиральной камере.

Для элементов проточного тракта нет карт уставок, в которых указываются предельно допустимые значения. Поэтому в качестве предельного механического напряжения в каждом элементе приняты значения предела текучести материала, так как при превышении предела текучести наступают необратимые деформации:

$$\sigma_{авар} = \sigma_{0,2} \cdot k_n, \quad (3)$$

где $\sigma_{0,2}$ - предел текучести материала, $k_n = 0,9$ – коэффициент надежности по условиям работы сооружения.

Верхней границей номинального интервала приняты расчетные кольцевые напряжения при отметке верхнего бьефа равной НПУ. Расчёт напряжений производился по формуле:

$$\sigma = p \cdot \frac{R}{d}, \quad (4)$$

где p – внутреннее давление, МПа; R – радиус кольца, м; d – толщина кольца, м.

Напряжения в элементах проточного тракта могут быть представлены в виде нечёткого интервала первого типа представленного, в частности в работе [10].

В дальнейшем расчет базовых и текущих оценок параметров проточного тракта на основе их нечетких интервалов и функций принадлежности производится в соответствии с разработанной ранее методикой, представленной в работе [1].

2. Большое количество результирующих оценок удобно для реализации управления на агрегатном уровне, когда необходимо выявить неисправность в отдельном узле или элементе, однако на станционном уровне управления такой объем информации является избыточным, поэтому в качестве обобщенного критерия эксплуатационной надежности выбирается один из

результатирующих параметров гидроагрегата, значения которого наиболее близки к аварийным.

Однако следует отметить, что группы параметров эксплуатационного состояния гидроагрегата и проточного тракта имеют разные физические принципы и временные рамки изменения значений. Это указывает на различную степень приоритетности данных групп в формировании обобщенной оценки.

Поэтому обобщенные оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата и проточного тракта формируются отдельно друг от друга

$$L_{V_k GA} = 1 - \max(J_{kGA}(P_i)), \quad (5)$$

$$L_{V_k ПТ} = 1 - \max(J_{kПТ}(P_j)). \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим модель формирования обобщенной оценки гидроагрегата для случая, когда значения 4 параметров гидроагрегата выходят за пределы нормальных значений (таблица 1).

Таблица 1 – Формирование обобщенной оценки гидроагрегата

№	Параметр	базовая оценка B_k о.е.	текущая оценка T_k о.е.	результатирующая оценка $J_k = B_k T_k$ о.е.	обобщенная оценка $L_{V_k GA}$ о.е.
1.	давление в кольцевых маслоохладителях генераторного подшипника	0,847	0,946	0,801	0,199
2.	расход воды через уплотнение вала	0,618	0,729	0,451	
3.	Контроль расхода воды на охлаждение подпятника	0,382	0,812	0,310	
4.	Абсолютное вертикальное виброперемещение ТП со стороны нижнего бьефа	0,375	0,965	0,362	

А также модель формирования обобщенной оценки для случая, когда механические напряжения на нескольких участках проточного тракта выходят за пределы нормальных значений (таблица 2).

Таблица 2 – Формирование обобщенной оценки проточного тракта

№	Параметр	базовая оценка B_k о.е.	текущая оценка T_k о.е.	результатирующая оценка $J_k = B_k T_k$ о.е.	обобщенная оценка $L_{V_k nm}$ о.е.
1.	Напряжения в оболочке водовода (сеч. 1-1)	0,553	0,634	0,350	0,599
2.	Напряжения в оболочке водовода (сеч. 2-2)	0,486	0,501	0,243	
3.	Напряжения в кольцевой арматуре (сеч. 2-2)	0,449	0,894	0,401	
4.	Напряжения в оболочке водовода (сеч. 8-8)	0,337	0,239	0,080	
5.	Напряжения в кольцевой арматуре (сеч. 8-8)	0,257	0,911	0,234	
6.	Напряжения в кольцевой арматуре (сеч. 1-1)	0,228	0,784	0,178	

Итоговая оценка формируется на основании двух обобщенных оценок:

$$L_{vk} = (L_{vk \text{ ГА}} + L_{vk \text{ ПТ}}) / k, \quad (7)$$

где, k - коэффициент, характеризующий степень приоритетности параметров.

$$L_{vk} = (0,199 + 0,599) / 2 = 0,39.$$

Величина L_{vk} – является обобщенной оценкой эксплуатационной надежности гидроагрегата в данном режиме работы, примем $k = 1/2$, т.е. принимается равноприоритетность каждой из 2 рассматриваемых групп.

Критерий экономичности режима работы ГА

Наиболее удобным параметром для отражения экономичности ГА является КПД. Данный параметр отражает не только количество энергоносителя, поступающего на лопасти гидротурбины, но и эффективность преобразования механической энергии в электрическую, а также потери энергии, возникающие в генераторе.

При использовании оценки экономичности для свёртки критериев характеристика КПД должна быть подвергнута нормировки с целью приведения критериев надежности и экономичности к единым единицам измерения. Для выполнения этой задачи также могут быть использованы нечеткие интервалы.

Условие нормировки экономического состояния агрегата можно записать так:

$$\forall k = 1, \dots, m; m \leq Z_{max}; L_{UK} = 1 - \left(\Delta a - \frac{(\eta^* - \eta_{min}) \Delta a}{\Delta \eta} \right), \quad (8)$$

где $\Delta \eta = (\eta_{max} - \eta_{min})$ представляет собой размах вариации КПД на работающих в данный момент агрегатах; η^* - фактический КПД на k - м работающем агрегате; $\Delta a = (a_{max} - a_{min})$ - размах вариации в оценках экономичности на станции. Он определяется следующим образом:

$$\eta_{max} \rightarrow (a_{max} = 1); \eta_{min} \rightarrow (a_{min} = 0,5), \quad (9)$$

Минимальное значение КПД агрегата не может быть меньше 0,5, поскольку это противоречит принципу оптимального управления режимом работы станции [5,6,7].

Таким образом, поступающие из АСУ ТП значения фактического КПД гидроагрегата могут быть сразу переведены в значения функции принадлежности.

В качестве примера представлена модель критерия экономичности для турбины РО230 – 833 – В – 677 при напоре $H = 200$ м. (таблица 3).

Таблица 3 – экономичность режима работы ГА

параметр	вид функции принадлежности	фактические значения КПД (η^*)	Значения L_{UK}
КПД гидроагрегата	$1 - \left(\Delta a - \frac{(\eta^* - \eta_{min}) \cdot \Delta a}{0,958} \right)$,	0,5	0,521
		0,75	0,782
		0,92	0,960
		0,958	1

В четвёртой главе рассмотрена новая методика многокритериальной оптимизации, а также представлены модели управления составом гидроагрегатов на основе процедуры идентификации стратегий управления.

В основе данного способа решения многокритериальных задач (многоцелевого управления) лежит возможность представления целей и ограничений, накладываемых на них, в виде нечетких множеств, которые определяют элементы субъективных предпочтений ЛПР.

Задачу свертывания критериев можно рассматривать как задачу комбинирования нечетких множеств с помощью теоретико-множественных операций над ними. При этом отдельная целевая функция может быть представлена как некоторое нечеткое множество, ограничивающее допустимые значения соответствующего критерия.

Тогда расплывчатое решение или просто решение следует определить как расплывчатое или нечеткое множество в пространстве возможных решений (рисунок 2).

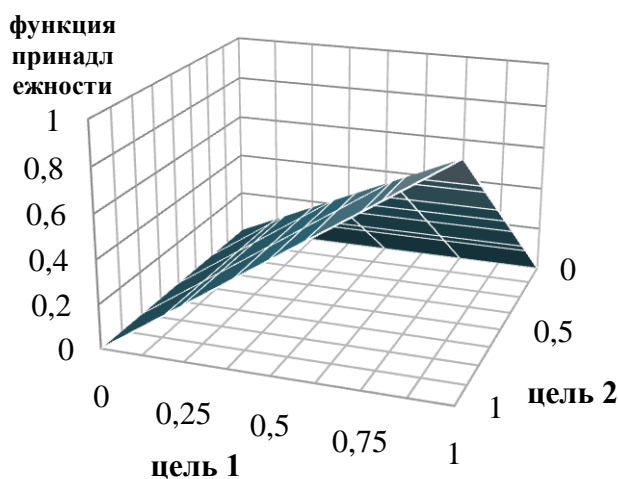


Рисунок 2 - Решение как нечеткое множество $h = \min(U, V)$

Имея определенный набор операций свертки, выражающих различные возможные стратегии поведения ЛПР, можно формализовано представить стратегию его поведения с помощью математической записи самой стратегии выбора решения.

Для формализации возможных типовых решений может быть использована процедура свертывания критериев.

К сожалению, традиционные методы оптимизации не позволяют охватить всё пространство

возможных вариантов управления ЛПР агрегатами ГЭС. Число возможных свёрток в этом случае ограничивается лишь двумя: поиск минимума $h = \min(U, V)$ и поиск максимума $h = \max(U, V)$. Использование этих свёрток приводит к доминированию одного из критериев и полному исключению компромисса между ними. Однако когда цели приобретают некоторые градации, связанные со степенью их достижения, стремление к компромиссу становится одной из естественных линий поведения ЛПР [2].

При появлении компромиссных вариантов условия задачи оптимизации требуют введения количественных оценок значимости каждого из рассматриваемых критериев. В связи с этим более разумным представляется использование процедуры идентификации стратегий управления.

Для оценки целей была предложена лингвистическая шкала уровней совместимости, представленная в работе [2], которая позволяет значительно

расширить множество возможных решений управления составом агрегатов ГЭС.

Имея широкий спектр операций, выражающих различные возможные стратегии поведения ЛПР и дискретизированную шкалу их оценки, можно рассмотреть варианты идентификации стратегии управления на основе предпочтений ЛПР по некоторым типовым ситуациям (таблица 4).

Таблица 4 - Оценка целей в различных ситуациях

Цели	Ситуация 1	Ситуация 2	Ситуация 3
Цель U (надежность гидроагрегата)	Плохо (0)	Средне (0,5)	Средне (0,5)
Цель V (экономичность гидроагрегата)	Отлично (1)	Средне (0,5)	Отлично (1)
Общая оценка состояния ГА	Заполняется ЛПР		

Тройки ответов по трём типовым ситуациям позволяют определить стратегию, которой придерживается ЛПР при управлении гидроагрегатами ГЭС. Каждая стратегия выражается в виде свёртки критериев эксплуатационной надежности и экономичности.

Для получения корректных результатов должны выполняться два правила.

Правило 1: Оценка обобщенной цели по ситуации 3 не может быть ниже оценки «достаточно хорошо», т.е.:

$$h(C, A) \geq C. \quad (10)$$

Правило 2: Оценка обобщенной цели по ситуации 3 может быть больше наибольшей из оценок по ситуациям 1 и 2 или равна ей, т.е.:

$$h(C, A) \geq \max(h(E, A), h(C, C)). \quad (11)$$

Руководствуясь данными правилами при идентификации целей, можно достаточно точно определить тип свёртки, описывающей стратегию управления в работе.

Предложен набор из 17 свёрток критериев, которые характеризуют возможные стратегии управления на ГЭС в зависимости от полученных при проектировании троек ответов по трём типовым ситуациям (таблица 5).

При анализе ответов ЛПР могут быть введены три категории свёрток целей: точные, близкие и достаточно близкие.

1. Точные свертки – это свертки, погрешность которых по оценкам ЛПР для всех трёх ситуаций составляет не более 0,125.
2. Близкие свертки – погрешность одной из оценок (любой) не более 0,25, а двух других не менее 0,125 (средняя погрешность равна 0,167).
3. Достаточно близкие свёртки – погрешность одной из оценок не более 0,125, а двух других – не более 0,25 (средняя погрешность составляет 0,208).

Полученные обобщенные оценки по каждому гидроагрегату являются показателями эффективности, т.е. выступают в роли количественной меры принадлежности критериев эксплуатационной надежности и экономичности ГА к цели управления:

$$S_{kj} = h_j(L_{VK}, L_{UK}), \quad (12)$$

где S_{kj} - оценки обобщенной цели по каждому работающему агрегату, рассчитываемые в соответствии с набором сверток, полученных при идентификации целей у ЛПР; $k = 1, \dots, m$ – количество работающих агрегатов; j – количество индивидуальных сверток h_j многоцелевой функции, определенных ЛПР с помощью процедуры идентификации целей.

Таблица 5 - Виды свёртывания критериев

Математический вид свёртки критериев	Ответы, описываемые точными свёртками	Ответы, описываемые близкими свёртками	Ответы, описываемые достаточно близкими свёртками
$\max(0, U + V - 1)$	EEC	DEC	DEB
$U \cdot V$	EDC	EEB EDB	
$\min(U, V)$	ECC		
\sqrt{UV} $(2UV)/(U + V)$	ECB	ECA EBB	EDA EBA
$med(U, V, 1/4)$	DCC	DCB DDC	DDB EBA
$\min(UV)/(1 - U - V)$ $med(U, V, 1/2)$	CCC	CDC	
$(U + V)/2$ $(U + V - UV)/(1 + U + V - 2UV)$ $\max(UV)/(1 + U - V)$	CCA	CBA CBA DCA	DBA DDA
$(U + V - UV)/(1 + U + V - 2UV)$	CCA	CBA CDA DCA	DBA DDA
$med(U, V, 3/4)$	BCB	BCA BBB BDB	BDA
$1 - \sqrt{(1 - U)(1 - V)}$ $\max(U, V)$	ACA	ADA	
$U + V - UV$	ABA	BBA	
$\max(1, U + V)$	AAA	AAB	

Примечание: А – оценка «отлично», В – оценка «хорошо», С – оценка «средне», D – оценка «удовлетворительно», Е – оценка «плохо».

На основе данных оценок может быть произведён непосредственный выбор номеров гидроагрегатов, эксплуатация которых наиболее или наименее целесообразна на станции в определённый момент времени.

Для определения модели возможного поведения оперативного персонала при управлении составом агрегатов на примере СШГЭС была проведена процедура идентификации стратегий управления, в рамках которой участвовали 11 начальников смен станции и диспетчеров ЦПУ.

Каждым из них были представлены ответы трём предложенным типовым ситуациям. Полученные результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Оценки экспертов по трём типовым ситуациям на СШГЭС

Персонал станции	Оценка 1 ситуации	Оценка 2 ситуации	Оценка 3 ситуации
1	Е	С	В
2	Е	В	А
3	Е	Д	С
4	Е	Д	В
5	Д	В	А
6	Е	С	А
7	Е	Д	В
8	Е	С	В
9	Д	С	А
10	Е	С	С
11	Е	С	В

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что различные начальники смены и диспетчера ЦПУ станции имеют совершенно разный взгляд на состояние гидроагрегатов в одних и тех же типовых ситуациях и в различной степени отдают предпочтение тем или иным критериям при управлении гидроагрегатами. Однако налицо явное стремление ЛПР к компромиссу и отсутствие в большинстве случаев жестких предпочтений критерию эксплуатационной надежности или критерию экономичности режима работы ГА.

В общем случае задача выбора предусматривает реализацию двух стратегий:

1. Целесообразность отключения наихудшего по эксплуатационному состоянию агрегата из числа работающих:

$$\forall j = 1, \dots, i; O_j = \min(S_{1j}, S_{2j} \dots S_{kj}). \quad (13)$$

2. Целесообразность включения наилучшего в соответствии с обобщенной целью агрегата из числа резервных:

$$\forall j = 1, \dots, R; B_j = \max(S_{1j}, S_{2j} \dots S_{kj}), \quad (14)$$

где, R - число агрегатов, находящихся в резерве.

На основе данных стратегий ЛПР формирует предпочтительное с его точки зрения решение, которому соответствует свёртка h_0 :

$$U_A = \begin{cases} O_{ЛПР} = f(h_0) \\ B_{ЛПР} = f(h_0) \end{cases} \quad (15)$$

Полученное в результате значение номера агрегата передаётся ЛПР, который вправе согласиться с ним или проигнорировать[8].

В таблице 6 представлена модель управления составом гидроагрегатов на основе двух критериев управления. В данном случае продемонстрировано как определяются наиболее приоритетные номера агрегатов при реализации стратегии отключения одного из работающих ГА на станции.

Рассмотрены две ситуации. В каждой из ситуаций имеются 4 ГА, при этом каждый гидроагрегат характеризуется своей оценкой эксплуатационной надежности и экономичности.

Приведены 7 свёрток: $h_1 = UV$; $h_2 = U + V - UV$; $h_3 = (U + V - UV)/(1 + U + V - 2UV)$; $h_4 = \max(U, V)$; $h_5 = \max(0; U + V - 1)$; $h_6 = \min(U, V)/(1 + |U - V|)$; $h_7 = \text{med}(U, V, 1/2)$.

Серым цветом выделен номер того гидроагрегата, эксплуатация которого наименее целесообразна при использовании определённой свёртки.

Данный пример наглядно показывает, что использование различных видов свёрток реализует разные стратегии управления составом гидроагрегатов ГЭС.

Таблица 7 - Выбор наиболее целесообразного для отключения гидроагрегата

ситуация	номер агрегата	U _k	V _k	№ свертки						
				h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
A	1	1	0,06	0,06	1,00	0,52	1	0,06	0,03	0,50
	2	0,93	0,2	0,19	0,94	0,54	0,93	0,13	0,12	0,50
	3	0,62	0,25	0,16	0,72	0,46	0,62	0,00	0,18	0,50
	4	0,5	0,1	0,05	0,55	0,37	0,5	0,00	0,07	0,50
B	1	1	0,3	0,30	1,00	0,59	1	0,30	0,18	0,50
	2	0,93	0,4	0,37	0,96	0,60	0,93	0,33	0,26	0,50
	3	0,62	0,7	0,43	0,89	0,61	0,7	0,32	0,57	0,62
	4	0,5	0,75	0,38	0,88	0,58	0,75	0,25	0,40	0,50

Оптимизационные алгоритмы подсистемы РУСА осуществляют поиск решений по критерию экономичности, однако такой подход может привести к ухудшению работы оборудования или даже аварии. ИНПОР позволяет учитывать эксплуатационное состояние гидроагрегатов и производить выбор с учётом близости параметров эксплуатационного состояния гидроагрегатов к аварийным значениям.

В таблице 8 приведено сравнение моделей выбора состава гидроагрегатов в рамках подсистем РУСА и ИНПОР

Таблица 8 – Результаты выбора состава гидроагрегатов в рамках подсистем РУСА и ИНПОР

№ ГА	L _U	L _V	Подсистема ИНПОР				Подсистема РУСА
			\sqrt{UV}	$\frac{2UV}{(U+V)}$	UV	$(\frac{U+V-UV}{1+U+V-2UV})$	
1	0,86	0,91	0,886	0,884	0,782	0,82	0,91
2	0,73	0,95	0,832	0,825	0,693	0,763	0,95
3	0,61	0,94	0,757	0,739	0,573	0,696	0,94
4	0,66	0,96	0,795	0,782	0,633	0,729	0,92

Таким образом, подсистема ИНПОР призвана дополнить подсистему РУСА. Значительная функциональная избыточность ИНПОР призвана повысить адаптационные свойства системы, что расширит возможности управления внутростанционными режимами ГЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. **Исследованы** принципы и средства управления гидроагрегатами ГЭС. Рассмотрены основные достоинства и недостатки применяемой в

настоящее время на ряде станций подсистемы РУСА. Основным её недостатком является несоответствие жестких алгоритмов оптимизации реальным целям, которые преследует персонал станции при управлении ГА ГЭС.

2. **Предложено** дополнить существующую подсистему РУСА подсистемой интеллектуальной поддержки оптимальных решений (ИНПОР), расширяющей её возможности по управлению числом и составом гидроагрегатов ГЭС. Разработаны принципы и алгоритмы ИНПОР в контуре оперативного управления.
3. **Проведён анализ** управления составом гидроагрегатов и предложено рассмотреть его как двухкритериальное: эксплуатационная надежность и экономичность. Доказана целесообразность применения теории нечетких множеств для решения данной задачи.
4. **Разработаны** модели формирования обобщенной оценки эксплуатационной надежности гидроагрегата с учетом контроля состояния проточного тракта и экономичности гидроагрегата
5. **Разработана** математические модели для идентификации стратегий управления составом гидроагрегатов. Проведение процедуры идентификации для каждой конкретной станции позволят формализовать стратегию двухкритериального управления агрегатами ГЭС в виде логико-множественной операции (свёртки), вид которой определяется приоритетностью указанных выше параметров.
6. **Полученные модели и алгоритмы реализованы** в виде программ и имитационных моделей в среде Delphi и MatLab Simulink. Эти программы могут стать основой программного обеспечения подсистемы ИНПОР, на базе АСУ ТП станции

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях входящих в перечень ВАК:

1. Sekretarev, Y. A. Mitrofanov, S. V. Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant / Y. A. Sekretarev, S.V. Mitrofanov // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. - 2013. - № 1 - С. 3-14
2. Секретарев, Ю.А. Митрофанов, С.В., Методика формирования обобщенного критерия состояния гидроагрегатов ГЭС на основе критериев эксплуатационной надежности и экономичности / Секретарев Ю.А., Митрофанов С. В. // Вестник НГТУ – 2013 - №2(51) – с. 204-213.

Публикации в других изданиях:

3. Митрофанов, С.В., Методы мониторинга и диагностики состояния гидротехнических сооружений ГЭС и новые пути развития / С. В. Митрофанов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIII всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х томах - Томск: ТПУ, 2011 - т.1. Электроэнергетическое направление с. 73-77.

4. Митрофанов, С. В., Оптимизация состава агрегатов ГЭС на основе теории возможностей / С. В. Митрофанов // НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях, Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2011. Часть 2, с. 89-93.
5. Митрофанов, С. В., Применение теории нечетких множеств в управлении составом агрегатов ГЭС / С. В. Митрофанов // Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» . В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2012. – с. 75-76.
6. Митрофанов, С. В. Секретарёв, Ю.А., Автоматизированное управление составом агрегатов ГЭС на основе критериев надежности и экономичности // С. В. Митрофанов; Секретарев Ю.А. // Сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 24-25 апреля 2012 г.): сборник трудов: в 2 ч., Изд-во ТГУ, 2012. – ч. 1. – с. 257 – 262.
7. Митрофанов, С.В., Применение процедуры свёртывания критериев для формирования двухкритериальной оценки состояния гидроагрегатов / С. В. Митрофанов // НАУКА, ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ти частях, Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. Часть 2, с. 154-157.
8. Митрофанов, С.В. Многокритериальная оптимизация состава агрегатов ГЭС на основе процедуры идентификации стратегий управления // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – с. 78-79.
9. Митрофанов, С.В. Методы выбора оптимального состава агрегатов на ГЭС // «Актуальные проблемы энергетики» материалы IV Международной научно-практической конференции / под ред. А.В. Павлова, 2013. - с. 207-209.
10. J. Secretarev, A. Zhdanovich, S. Mitrofanov., Application of fuzzy sets for representation of hydro power plants operational condition/ The 8th international forum on strategic technology 2013 (IFOST 2013)/ Volume II/ Ulaanbaatar, Mongolia 2013 – pp. 605-609.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л., тираж 100 экз.
заказ № подписано в печать г.