

На правах рукописи



Панова Яна Валерьевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТАВОМ
АГРЕГАТОВ НА ГЭС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Секретарёв Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты: **Лукутин Борис Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, отделение электроэнергетики и электротехники, профессор;

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

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «19» декабря 2019 г. в 10:00 ч в малом конференц-зале (1 корпус, к. 316) на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Г. П. Лыщинского Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации: <https://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «___» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие современной гидроэнергетики невозможно без совершенствования средств, обеспечивающих мониторинг текущего состояния оборудования в целях обеспечения надежности и определения оптимальных режимов его работы. Одной из важнейших задач при эксплуатации гидроэлектростанций является рациональное использование гидроресурсов. Одним из способов повышения эффективности использования ресурсов и, следовательно, работы станции, является определение рационального состава гидроагрегатов при оптимальном распределении нагрузки между ними.

Таким образом, задача оптимизации на ГЭС сводится к повышению КПД гидроагрегатов, несущих нагрузку при соблюдении всех требований к надежности их функционирования. Сложность решения данной задачи заключается в её многокритериальности, а также необходимости выполнения большого количества ограничений, среди которых: необходимость выполнения гидроэлектростанцией системных функций по поддержанию напряжения в энергосистеме и регулированию перетоков мощности, при том условии, что количество гидроагрегатов может находиться в пределах от одного до нескольких десятков; необходимость исполнения планового диспетчерского графика и плана по выработке электроэнергии; необходимость рационального использования механического ресурса гидроагрегатов и т. д. Все эти условия должны быть учтены в той или иной степени в процессе выбора оптимального состава агрегатов. Кроме решения задачи оптимизации состава агрегатов, система рационального управления должна также решать задачу определения очередности подключения/отключения агрегатов к числу работающих при плановом изменении нагрузки.

В настоящее время задача многокритериальной оптимизации режима не решена на абсолютном большинстве гидроэлектростанций. Ведение режима осуществляется по заранее определенному плану без учета степени износа генерирующего оборудования. Недопустимость такой работы ГЭС, к сожалению, доказывают аварии, происходящие на станциях.

Всё вышесказанное позволяет утверждать, что исследования, направленные на изучение и разработку систем мониторинга и оптимизации режимов работы ГЭС актуальны и на сегодняшний день.

Степень разработанности темы. В нашей стране существуют исследования, посвященные разработке алгоритмов по поиску рационального состава гидроагрегатов (подсистема РУСА). Одним из основоположников развития подсистемы РУСА в СССР и России в 70-х годах двадцатого века была Т. А. Филиппова. В своих работах она представила модели и методы рационального управления составом агрегатов, которые легли в основу системы АСУ ТП Воткинской и Красноярской гидроэлектростанций.

Основу методики определения рационального состава агрегатов по критерию наилучшего эксплуатационного состояния, предложенной Ю. А. Секретаревым в 90-х годах прошлого века, составляет теория возможностей, а многокритериальная оптимизация производится по правилу

свертывания отдельных критериев эксплуатационного состояния и текущей экономичности режима.

Помимо указанных исследователей, большой вклад в разработку систем управления составом агрегатов на гидроэлектростанциях внесли: Н. В. Арефьев, В. М. Горнштейн, В. Л. Жирнов, В. Г. Журавлев, Н. А. Картвелишвили, Г. С. Киселёв, М. Д. Кучкин, А. И. Лазебник, Б. В. Лукутин, Н. К. Малинин, В. И. Обрезков, Г. М. Павлов, К. А. Смирнов, М. Г. Тягунов, В. Д. Урин, М. П. Федоров, Е. В. Цветков и другие.

В последнее время многие исследователи и организации возродили интерес к данному направлению в науке. Примером может служить распоряжение ПАО «РусГидро» от 19.01.2017 № 17р, где представлены базовые требования по организации методических указаний в целях реализации концепции рационального управления составом гидроагрегатов. Среди актуальных современных разработок также можно выделить работы НПФ «Ракурс», описывающие применение подсистемы РУСА на Братской и Усть-Илимской ГЭС.

Современные возможности вычислительной техники и развитие интеллектуальных подходов позволяют решить задачу создания подсистемы поддержки принятия решения и модернизировать саму систему управления составом гидроагрегатов на ГЭС.

Цель работы. Используя методы теории возможностей, разработать алгоритм системы многоцелевого управления составом агрегатов и их загрузкой, в которой наиболее полно на основе теории возможностей учитываются и оцениваются текущее состояние гидроагрегатов, требования энергосистемы к режиму работы, а также текущие параметры экономичности выработки электроэнергии.

Задачи, поставленные для достижения цели работы:

1. Определить оптимизационные критерии в управлении гидроэлектростанцией на основе анализа исследований по разработке, созданию и опыту эксплуатации подсистем РУСА на различных гидростанциях.
2. Разработать на основе теории возможностей метод оценки важности и значимости состава гидроагрегатов с учетом эксплуатационной надежности и текущей экономичности режимов их работы.
3. Разработать принципы и алгоритмы оптимизации работы гидроагрегатов ГЭС по отдельному оптимизационному критерию, а также с учетом их компромисса.
4. Разработать и реализовать в программном комплексе MatLAB математические модели и алгоритмы функционирования системы поддержки принятия решений (СППР) и подсистемы рационального управления составом агрегатов (РУСА), основанных на вышеуказанных подходах.

Научная новизна:

1. Разработаны правила масштабирования нечетких интервалов, которые позволяют осуществлять сравнительный анализ различных по своей физической сущности параметров контроля текущего состояния оборудования гидроагрегатов.

2. Обоснована целесообразность оценивания важности и значимости состава гидроагрегатов с учетом их текущего эксплуатационного состояния, на основе разработанных правил масштабирования.

3. Впервые введено понятие обобщённого нечёткого интервала как способа получения текущего "снимка" интегрального (полного) эксплуатационного состояния гидроагрегата на основе фактических показаний датчиков автоматического контроля режима его работы.

4. Разработаны алгоритмы управления составом гидроагрегатов на ГЭС по двум критериям: на основе обобщенных нечетких интервалов их эксплуатационного состояния, реализации текущей оценки экономичности режима работы гидроагрегата с учетом изменчивости энергетической характеристики турбины, а также путем компромисса между этими критериями.

Практическая ценность и реализация результатов:

1. Предложенные методы расчета оценок экономичности текущего режима работы и эксплуатационного состояния каждого из гидроагрегатов на станции позволяют определять диапазоны рекомендуемых мощностей для каждого гидроагрегата, при работе в которых будет достигнут наилучший КПД станции при распределении нагрузки между наиболее надёжными агрегатами.

2. Разработанная модель получения результирующей оценки текущего состояния гидроагрегата позволяет решать задачу выбора наилучшего состава работающих агрегатов в режиме реального времени и может быть положена в основу работы системы рационального управления составом агрегатов на ГЭС.

3. Модернизированная система управления нормальными режимами работы гидроэлектростанции на основе методов теории возможностей позволит усовершенствовать алгоритмы подсистемы РУСА в части визуализации текущего эксплуатационного состояния гидроагрегатов, а также улучшить технико-экономические показатели станции.

4. Практическое применение представленных в диссертации алгоритмов, положений и выводов подтверждается справками об использовании научных достижений и актами внедрения, полученными от Новосибирской, Саяно-Шушенской и Нурекской гидроэлектростанций.

5. Разработанные концепции, принципы и методы ситуационного управления излагаются в курсах «Гидроэнергетика» и «Выбор и принятие решений в электроэнергетике» в Новосибирском государственном техническом университете, что подтверждается актом внедрения положений диссертационной работы в учебный процесс указанного вуза.

Методы исследования. В работе использовались положения теории вероятностей и математической статистики, теории автоматического управления, теории надёжности, теории возможностей, теории нечётких множеств, а также методы многокритериальной оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Правила масштабирования, позволяющие сравнивать между собой различные по своей физической сущности параметры контроля за текущим состоянием оборудования гидроагрегатов, представленные нечеткими интервалами.

2. Метод расчёта обобщенного нечёткого интервала как интегральной оценки текущего эксплуатационного состояния гидроагрегата, полученной на основе фактической информации от различных датчиков контроля.

3. Метод расчёта оценки степени экономичности текущего режима работы гидроагрегата, основанный на представлении параметров изменчивости энергетических характеристик гидроагрегата в виде нечётких интервалов.

4. Модель системы поддержки принятия решений при двухкритериальном управлении составом гидроагрегатов, в которой реализуется управление по критерию максимальной надёжности или наибольшей экономичности режима работы ГЭС, а также компромиссное между ними решение.

5. Модель системы рационального управления составом агрегатов, определяющая состав и загрузку оборудования, при котором достигается максимально возможный КПД станции при заданном значении вырабатываемой мощности с учетом текущего эксплуатационного состояния гидроагрегатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов аналитического расчёта оптимизационных показателей текущего эксплуатационного состояния и экономичности режима работы гидроагрегата (на примере Новосибирской ГЭС) проведенным вычислительным экспериментам.

Используемые в расчетах методы теории нечетких множеств, теории возможностей, а также оптимизационные алгоритмы хорошо изучены и неоднократно доказали правомерность своего использования. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на различных всероссийских и международных конференциях с привлечением, в том числе, сотрудников службы эксплуатации действующих гидроэлектростанций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: «Наука. Технологии. Инновации (НТИ)» (г. Новосибирск, 2014, 2016, 2017 гг.), «Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering (EEM)» (г. Новосибирск, 2014 г.), «Гидроэнергетика в XXI веке» (пос. Черёмушки, 2014, 2015, 2017, 2018 гг.), «Энергия» (г. Иваново, 2015, 2016 гг.), «International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)» (г. Челябинск, 2016 г.), «Борисовские чтения» (г. Красноярск, 2017 г.), «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП)» (г. Новосибирск, 2018 г.), «Энергетические системы» (г. Белгород, 2018 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 4 – в рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 2 – в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 102 библиографические ссылки и 3 приложений. Текст диссертации изложен на 200 страницах, содержит 59 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, положения, выносимые на защиту и практическая ценность результатов работы.

В первой главе представлены виды управления гидроагрегатами на ГЭС, среди которых: технологическое, оперативное и ситуационное. Последний способ вызван необходимостью учёта таких особенностей гидроэлектростанций как адаптивность, многокритериальный характер управления, а также необходимость принимать решения о составе и загрузке агрегатов в условиях неопределенности, расплывчатости исходной информации о их текущем состоянии. Таким образом, ситуационное управление – это управление по текущему состоянию объекта, обладающее свойством двойственности (рисунок 1). С одной стороны, осуществляется поддержание заданного режима работы оборудования, т. е. *регулирование* состояния. С другой стороны – принятие решений об изменении режима работы гидроагрегатов, т. е. *управление* ими.



Рисунок 1 – Ситуационное управление составом агрегатов на станции

Процесс управления агрегатами осуществляется лицом, принимающим решения (ЛПР) с использованием возможностей подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений (СППР). *Процесс регулирования* осуществляется с помощью режимной и технологической автоматики станции, в частности, подсистемой рационального управления составом агрегатов (РУСА). Подсистема РУСА осуществляет автоматический поиск оптимального количества, состава и загрузки агрегатов по активной мощности с учетом всех ограничений, накладываемых на режим работы станции при выполнении диспетчерского графика нагрузки. В свою очередь, задачей подсистемы СППР является

предоставление ЛПР наиболее полной информации о текущем состоянии оборудования при принятии им самостоятельных решений об осуществлении управляющих воздействий на какой-либо агрегат, например, при превентивном управлении.

В обоих случаях подсистемами осуществляется оценка текущего состояния гидроагрегата в виде показателей его текущего эксплуатационного состояния $T(\Pi)$ и экономичности текущего режима выработки электроэнергии $E(\eta)$. Способам получения этих оценок посвящены главы 2 и 3 диссертации.

Во второй главе выполняется разработка метода получения оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата при представлении его параметров в виде нечетких интервалов (рисунок 2).

Применительно к контролю за параметрами оборудования ГЭС:

ядро нечеткого интервала описывает допустимый диапазон изменения значений N_0 и задается при помощи нижнего (\underline{m}) и верхнего (\bar{m}) модальных значений нечеткого интервала; левым (α) и правым (β) коэффициентами нечеткости характеризуется возможное ухудшение параметров оборудования, но не приводящие к его автоматическому отключению средствами РЗиА.

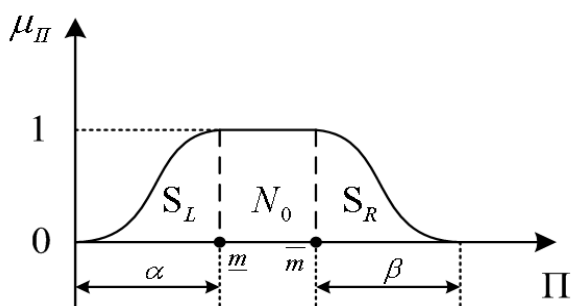


Рисунок 2 – Общий вид нечеткого интервала

Исходная информация о диапазонах нормальных и допустимых значений эксплуатационных параметров может быть получена на основании карт уставок и технологических защит гидроагрегатного блока (турбина, генератор, блочный трансформатор) на ГЭС. Способ преобразования какого-либо из рассматриваемых эксплуатационных параметров Π , основанный на логике построения нечетких интервалов, состоит в определении принадлежности текущего значения параметра к следующим диапазонам:

- 1) $\Pi \subset [\underline{m}; \bar{m}]$ – соответствие параметра диапазону нормальных значений;
- 2) $\Pi \subset (\underline{m} - \alpha; \underline{m})$ – ухудшенное состояние параметра, значение меньше нормального;
- 3) $\Pi \subset (\bar{m}; \bar{m} + \beta)$ – ухудшенное состояние параметра, значение больше нормального;
- 4) $\Pi \notin (\underline{m} - \alpha; \bar{m} + \beta)$ – выход параметра из зоны допустимых значений, срабатывание защиты на отключение агрегата.

Зависимость $\mu(\Pi)$, описывающая форму нечеткого интервала, носит название *функции принадлежности*. Как видно из рисунка 2, кривая функции принадлежности обладает нелинейностью, такую форму принято называть *колоколообразной*. Таким образом, составление уравнения функции принадлежности является довольно сложной задачей. Однако исследования показали, что нелинейные части интервала можно существенно упростить,

преобразовав в линейные зависимости. При этом потеря точности вычислений будет незначительной (менее 1%).

Нечеткие интервалы могут не иметь одного из коэффициентов нечеткости, что видно из рисунка 3. Это зависит от возможного изменения значений параметра Π . Так, если параметр не может отклоняться в меньшую сторону от своих нормальных значений ($\alpha = 0$), нечеткий интервал принимает вид рисунка 3 а и называется *невозрастающим*. Если изменения параметра невозможно в большую сторону ($\beta = 0$), нечеткий интервал принимает вид рисунка 3 б и называется *неубывающим*. Если же параметр имеет допустимые зоны отклонения, как в большую, так и в меньшую сторону ($\alpha \neq 0, \beta \neq 0$), нечеткий интервал принимает вид рисунка 3 в и называется *трапецевидным*.

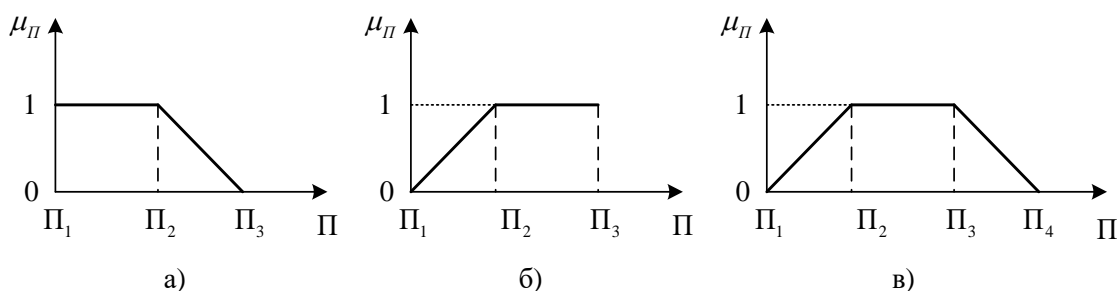


Рисунок 3 – Виды нечетких интервалов, описывающих изменение контролируемого параметра Π :

а) невозрастающий; б) неубывающий; в) трапецевидный

После получения нечетких интервалов параметров оборудования, необходимо произвести оценку их текущего состояния, что требует сравнения интервалов между собой. Однако, разная размерность эксплуатационных параметров не позволяет это сделать. Это значит, что необходимо перевести всю информацию в разряд безразмерной. Возможность перехода обоснована использованием статистических методов, в частности, расчетом относительных величин. По своей природе относительные величины (ОВ) производны от деления текущего (сравниваемого) абсолютного показателя на базисный показатель, то есть:

$$ОВ = \frac{\text{текущее значение}}{\text{базисное значение}} * 100\% \quad (1)$$

Приведем формулы перехода к относительным единицам для каждого из возможных видов нечеткого интервала (рисунок 3) при учете некоторых замечаний.

Замечание 1. В соответствии с выражением (1), в качестве базисного значения эксплуатационного параметра гидроагрегата следует принять значение параметра Π , при котором выполняется условие $\mu(\Pi) = 1$, то есть базисное значение параметра Π лежит в диапазоне $\Pi_6 \in [\underline{m}; \bar{m}]$.

Замечание 2. В качестве базисного, примем предельное значение нечеткого интервала, то есть некую "крайнюю точку" нормального состояния оборудования, при превышении которой изменение состояния сопровождается отключением агрегата.

Замечание 3. Расчет относительных единиц в процентных соотношениях не имеет необходимости.

Исходя из перечисленных *правил масштабирования* получим:

1. Невозрастающий нечеткий интервал (рисунок 3 а).

В данном случае:

$$\Pi_1 = \underline{m}; \Pi_2 = \bar{m}; \Pi_3 = \Pi_2 + \beta.$$

Предельным значением, или "крайней точкой", здесь является наименьшее из возможных значений параметра – Π_1 , поскольку, при приближении к нему справа, то есть при убывании параметра Π , невозможно достичь величины $\Pi < \Pi_1$ в нормальном режиме работы. Это значение примем в качестве базисной величины, $\Pi_6 = \Pi_1$.

Тогда, согласно выражению (1):

$$\begin{aligned} \Pi_1^* &= \underline{m}^* = \frac{\Pi_1}{\Pi_6} * 100 = \frac{\Pi_1}{\Pi_1} * 100 ; \\ \Pi_2^* &= \bar{m}^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_6} * 100 = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} * 100 ; \\ \alpha^* &= 0 ; \end{aligned} \tag{2}$$

$$\beta^* = \Pi_3^* - \Pi_2^* = \frac{\Pi_3}{\Pi_6} * 100 - \frac{\Pi_2}{\Pi_6} * 100 = \frac{\Pi_3}{\Pi_1} * 100 - \bar{m}^*.$$

2. Неубывающий нечеткий интервал (рисунок 3 б).

В данном случае:

$$\Pi_2 = \underline{m}; \Pi_3 = \bar{m}; \Pi_1 = \Pi_2 - \alpha.$$

Предельным значением параметра здесь является наибольшее из возможных – Π_3 (по аналогичным соображениям). Значит, $\Pi_6 = \Pi_3$.

Тогда, согласно выражению (1):

$$\begin{aligned} \Pi_2^* &= \underline{m}^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_6} * 100 = \frac{\Pi_2}{\Pi_3} * 100 ; \\ \Pi_3^* &= \bar{m}^* = \frac{\Pi_3}{\Pi_6} * 100 = \frac{\Pi_3}{\Pi_3} * 100 ; \\ \alpha^* &= \Pi_2^* - \Pi_1^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_6} * 100 - \frac{\Pi_1}{\Pi_6} * 100 = \underline{m}^* - \frac{\Pi_1}{\Pi_3} * 100 ; \\ \beta^* &= 0. \end{aligned} \tag{3}$$

3. Трапецевидный нечеткий интервал (рисунок 3 в).

При определении параметров нечеткого интервала третьего типа, учитывая обозначения, приведенные на рисунке 3, при расчёте значений \underline{m}^* , α^* , формулы (3) унифицированного пересчета для интервала второго типа (рисунок 3 б) остаются теми же, а для нечеткого интервала первого типа при расчете значений \bar{m}^* , β^* , в выражение (2) вводятся следующие коррективы: $\Pi_1 = \Pi_2$; $\Pi_2 = \Pi_3$; $\Pi_3 = \Pi_4$.

Тогда:

$$\begin{aligned} \Pi_2^* &= \underline{m}^* = \frac{\Pi_2}{\Pi_3} * 100 ; \\ \Pi_3^* &= \bar{m}^* = \frac{\Pi_3}{\Pi_2} * 100 ; \\ \alpha^* &= \Pi_2^* - \Pi_1^* = \underline{m}^* - \frac{\Pi_1}{\Pi_3} * 100 ; \\ \beta^* &= \Pi_4^* - \Pi_3^* = \frac{\Pi_4}{\Pi_2} * 100 - \bar{m}^*. \end{aligned} \tag{4}$$

После преобразований можно переходить к расчету функции принадлежности $\mu(\Pi)$. В данном случае, параметры Π , попадающие в зону нормальных значений, интереса не представляют, им присваивается $\mu(\Pi) = 1$. Это означает, что элемент находится в нормальном работоспособном состоянии. Параметрам, попадающим в левую или правую части нечёткого интервала следует присвоить значения, описываемые линейной функцией $\mu(\Pi)$.

Приведем пример перехода к относительным единицам и расчета функции принадлежности нечеткого интервала параметра гидроагрегата «Давление в гидроаккумуляторе МНУ»:

- нормальное состояние параметра: 22,5-25 кгс/см²;
- предельное значение: не ниже 16,5 и не выше 25,6 кгс/см².

Вид интервала – трапецевидный, следовательно, применим формулы (4). Результат представлен на рисунке 4:

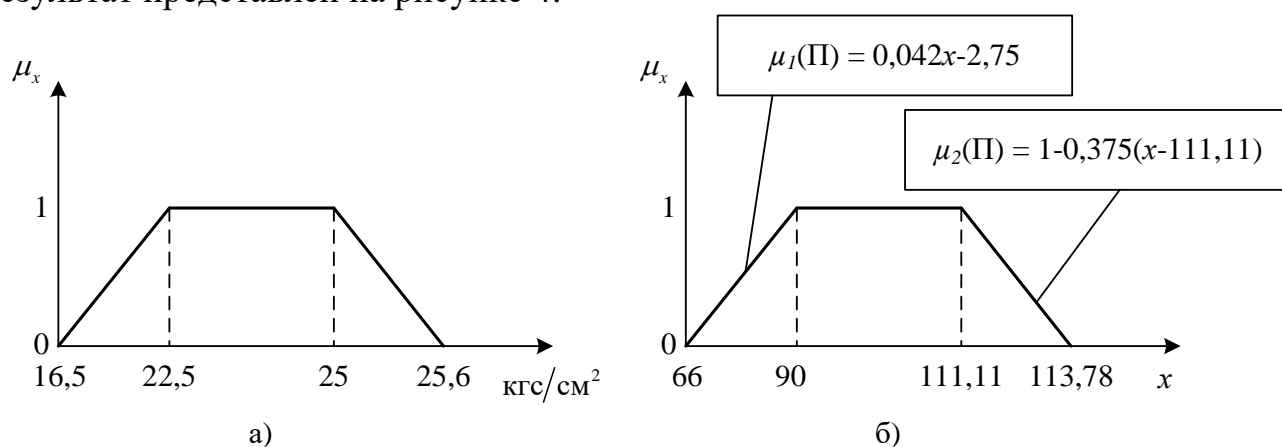


Рисунок 4 – Нечёткий интервал и функция принадлежности параметра «Давление в гидроаккумуляторе МНУ»:

а) именованные единицы (кгс/см²); б) относительные единицы

Текущие оценки характеризуют степень эксплуатационной надежности агрегата в момент принятия решений t и их целесообразно находить непосредственно на нечетком интервале. Если значение «1» функции принадлежности говорит о нормальном состоянии контролируемого параметра, значение «0» – о его неудовлетворительном состоянии, то чем ближе значение к «0», тем хуже состояние контролируемого объекта. Следовательно, понятие текущей оценки эксплуатационного состояния не противоречит понятию значения функции принадлежности параметра. Тогда можно принять:

$$T(\Pi) = \mu(\Pi) \quad (5)$$

При расчете *интегральной оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата* необходимо учесть значения всех контролируемых параметров, т. е. на момент принятия решения формируется *объективный снимок текущего эксплуатационного состояния гидроагрегатов на основе измерения всех параметров*. Это возможно осуществить на основе использования так называемого *обобщенного нечеткого интервала (ОНИ)*.

ОНИ – это показатель, характеризующий полное текущее состояние гидроагрегата. Другими словами, полное описание эксплуатационного состояния гидроагрегата осуществляется за счет объединения нечетких интервалов всех тех

параметров состояния, значения которых вышли за пределы своего нормального диапазона. Общая схема расчета показана на рисунке 5. Взаимное влияние параметров в этом случае учитывать отдельно нет необходимости, так как все они в разной степени участвуют в формировании ОНИ.

На основании предложенного способа был разработан алгоритм расчета текущих оценок эксплуатационного состояния гидроагрегатов (или гидроблоков).

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОАГРЕГАТА

Этап I. Формирование исходных данных.

Шаг 1. Для всех параметров, входящих в состав гидроагрегата, формируются нечеткие интервалы в виде четверки параметров $N_i = (\underline{m}_i, \bar{m}_i, \alpha_i, \beta_i)$. Информация об этих параметрах известна и содержится в картах уставок автоматики и технологических защит гидроагрегатов и блочных трансформаторов.

Шаг 2. Получение фактических значений параметров на момент времени t – Π_i^t в именованных единицах.

Шаг 3. Перевод значений Π_i^t из именованных в относительные единицы по известным формулам (2) – (4).

Шаг 4. Наложение каждого Π_i^t на соответствующий нечеткий интервал и получение значения его функции принадлежности $\mu(\Pi_i^t)$.

Шаг 5. Расчет текущей оценки каждого параметра: $T(\Pi_i^t) = \mu(\Pi_i^t)$.

Шаг 6. Расчет общего отклонения параметров Δ_i как суммы отклонений всех параметров, значения текущих оценок которых отличны от единицы.

Этап II. Отбор и преобразование нечетких интервалов

Шаг 1. Отбор параметров, для которых выполняется условие:

$0 < \mu(\Pi_i^t) < 1$, где $\mu(\Pi_i^t)$ рассчитано на этапе I, шаг 4.

Шаг 2. Получение информации об изменении значения каждого параметра в большую или меньшую сторону от диапазона нормальных значений:

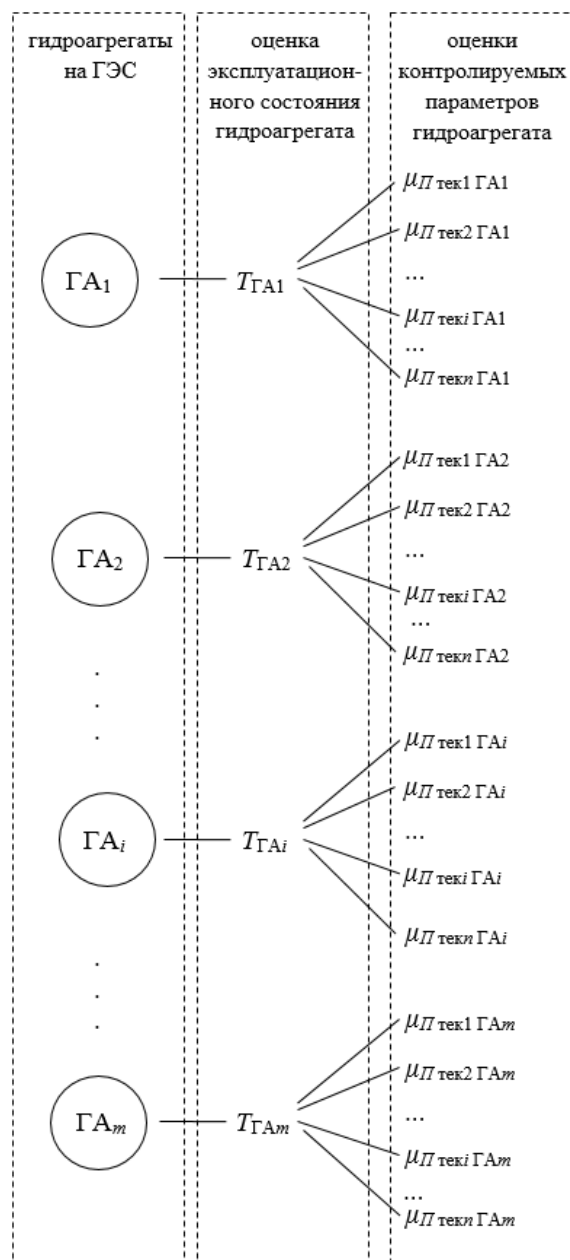


Рисунок 5 – Схема определения оценок гидроагрегатов

- производится расчет функции принадлежности i -го параметра от значения, отличающегося от Π_i^t на малую величину $\partial\Pi_i^t$ – значение $\mu(\Pi_i^t - \partial\Pi_i^t)$;
- полученное значение сравнивается с уже известным $\mu(\Pi_i^t)$;
- если выполняется условие: $\mu(\Pi_i^t) - \mu(\Pi_i^t - \partial\Pi_i^t) > 0$, это значит, что параметр i вышел за пределы диапазона нормальных значений в *меньшую* сторону, то есть его нечеткий интервал имеет неубывающий вид (рисунок б а);
- если выполняется условие: $\mu(\Pi_i^t) - \mu(\Pi_i^t - \partial\Pi_i^t) < 0$, это значит, что параметр Π_i вышел за пределы диапазона нормальных значений в *большую* сторону, то есть его нечеткий интервал имеет невозрастающий вид (рисунок б б).

Шаг 3. Преобразование всех отобранных параметров с неубывающим нечетким интервалом в невозрастающий вид.

Этап III. Получение обобщенного нечеткого интервала гидроагрегата

Шаг 1. Расчет значений $m_{OI}, \bar{m}_{OI}, \alpha_{OI}, \beta_{OI}$.

Шаг 2. Построение графика обобщенного интервала.

Шаг 3. Расчет уравнения функции принадлежности обобщенного нечеткого интервала гидроагрегата, а также получение её значения $\mu_{ГА}$.

Шаг 4. Расчет текущей оценки гидроагрегата: $T(\Pi)_{ГА} = \mu_{ГА}$.

Таким образом, на основании полученных текущих оценок, дежурный персонал будет иметь возможность быстро оценить фактическое эксплуатационное состояние всех гидроагрегатов.

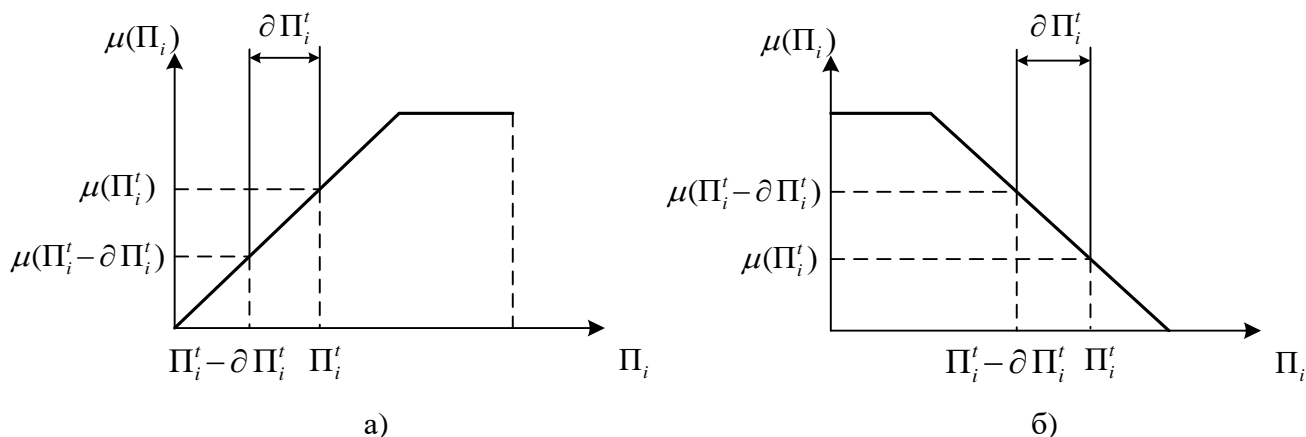


Рисунок 6 – Определение направления выхода значения параметра из диапазона нормальных значений
а) в меньшую сторону; б) в большую сторону

Схематично, весь описанный выше процесс можно представить в виде рисунка 7.

Получение текущей оценки состояния каждого из гидроагрегатов на станции позволит определить *ранжированный ряд гидроагрегатов*, построенный в порядке ухудшения надежности работы каждого из них. Этот ряд фактического состояния объектов управления, или «снимок» их показателей работоспособности, как будет показано ниже, имеет важное значение при выборе оптимального состава работающих агрегатов подсистемой РУСА.

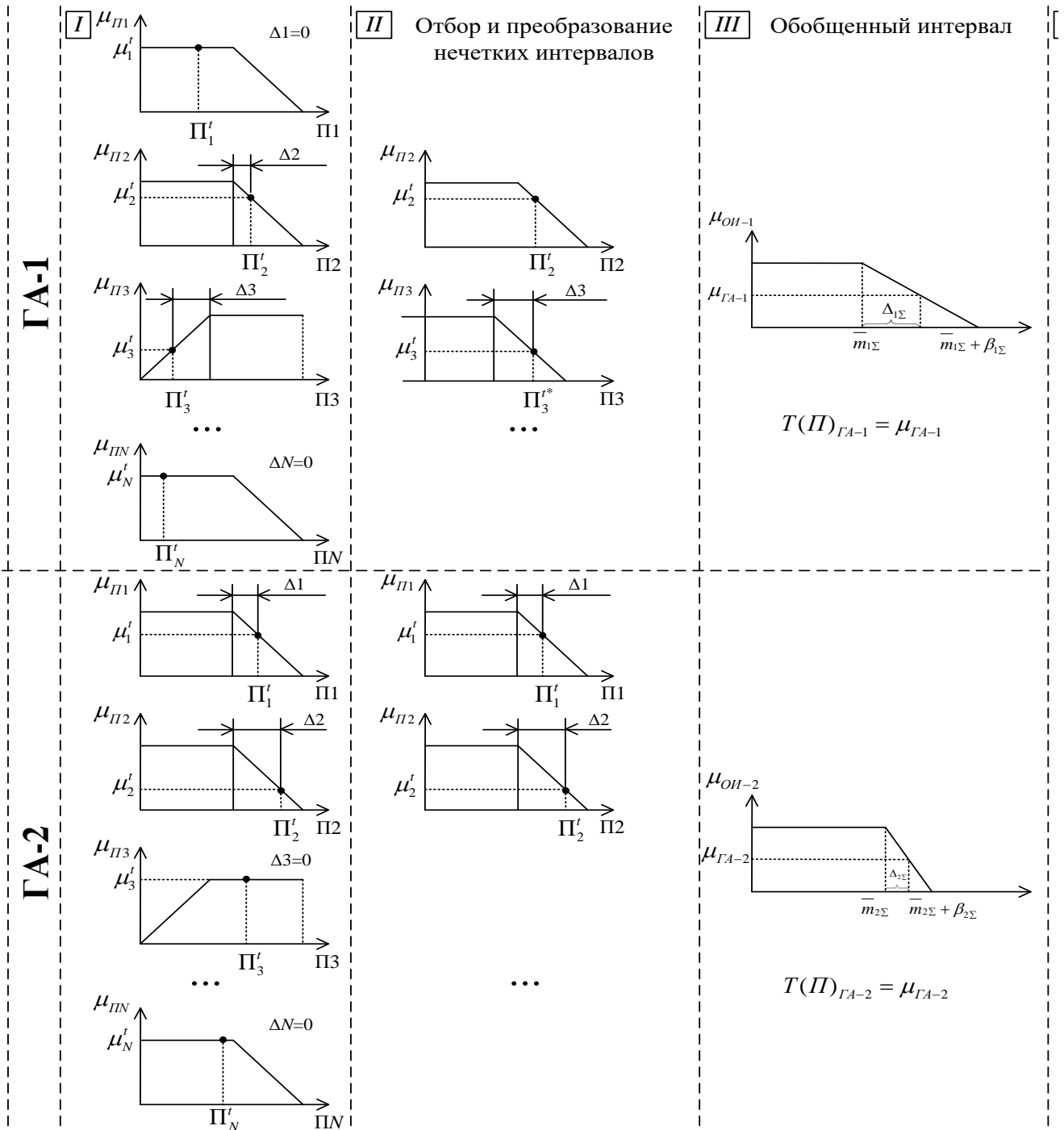


Рисунок 7 – Получение текущей оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата на основе построения его ОИ

В третьей главе диссертации рассмотрен метод расчета экономичности текущего режима работы гидроагрегата, основанный на анализе энергетических характеристик его турбины.

Поскольку основным показателем экономичности текущего режима работы станции является величина расхода энергоресурса, в данном случае – расхода воды через турбины гидроагрегатов, для анализа этого показателя целесообразно использовать величину КПД ГЭС, поскольку КПД связан с денежными издержками работы оборудования.

На основании сказанного, можно утверждать, что оценку, или степень, экономичности режима работы гидроагрегата можно определить, исходя из его энергетических характеристик. Зависимость КПД турбины гидроагрегата от вырабатываемой ей мощности при постоянстве напора называется *рабочей характеристикой турбины*. В качестве примера, на рисунке 8 представлены характеристики турбин агрегатов №А и №В Новосибирской ГЭС.

По ряду причин, рабочие характеристики могут менять форму кривой: смещается её максимум, сильно снижаются показатели на отрезке минимальных мощностей и т. п. – всё это указывает на износ турбины. Поскольку агрегаты на станции эксплуатируются в различных режимах, то и рабочие характеристики их гидротурбин будут искажаться по-разному. В

связи с вышеуказанными особенностями, возникает необходимость *учета изменчивости характеристик* и их корректировка, поскольку имеющаяся на гидроэлектростанции информация со временем теряет свою актуальность.

Учитывая неточность, недостаточную достоверность значений, определяемых по рабочей характеристике турбины, значение текущего КПД, исходя из заданной мощности турбины *следует преобразовать в нечеткий интервал*. Это позволит перейти от определения КПД турбины к оценке экономичности работы агрегата. Изменяющееся в зависимости от вырабатываемой мощности значение КПД (или фактический КПД) означает, что оценка экономичности также должна изменяться. Учитывая нелинейность характера изменения $\eta(N)$ выразить оценку экономичности в виде функциональной зависимости довольно затруднительно. Таким образом, текущую оценку экономичности работы гидроагрегата в виде нечеткого интервала необходимо получить в каждой точке рабочей характеристики при текущем (или запланированном) значении мощности агрегата (рисунок 9).

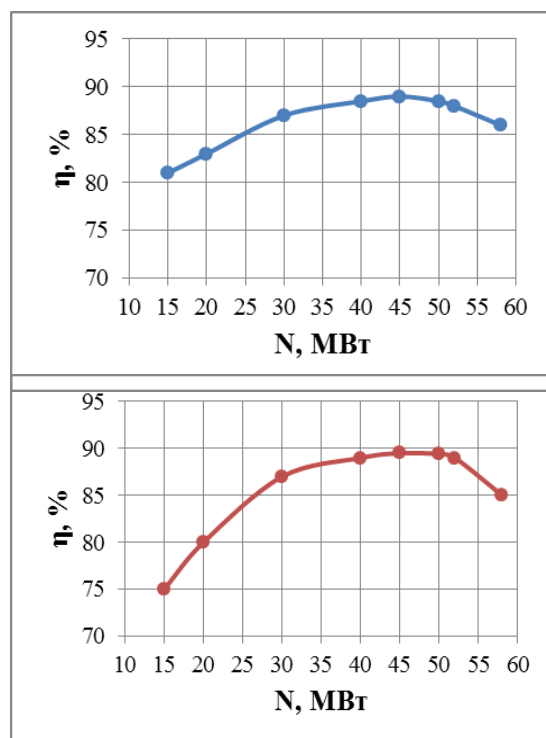


Рисунок 8 – Рабочие характеристики турбин
а) гидроагрегат № А,
б) гидроагрегат № В

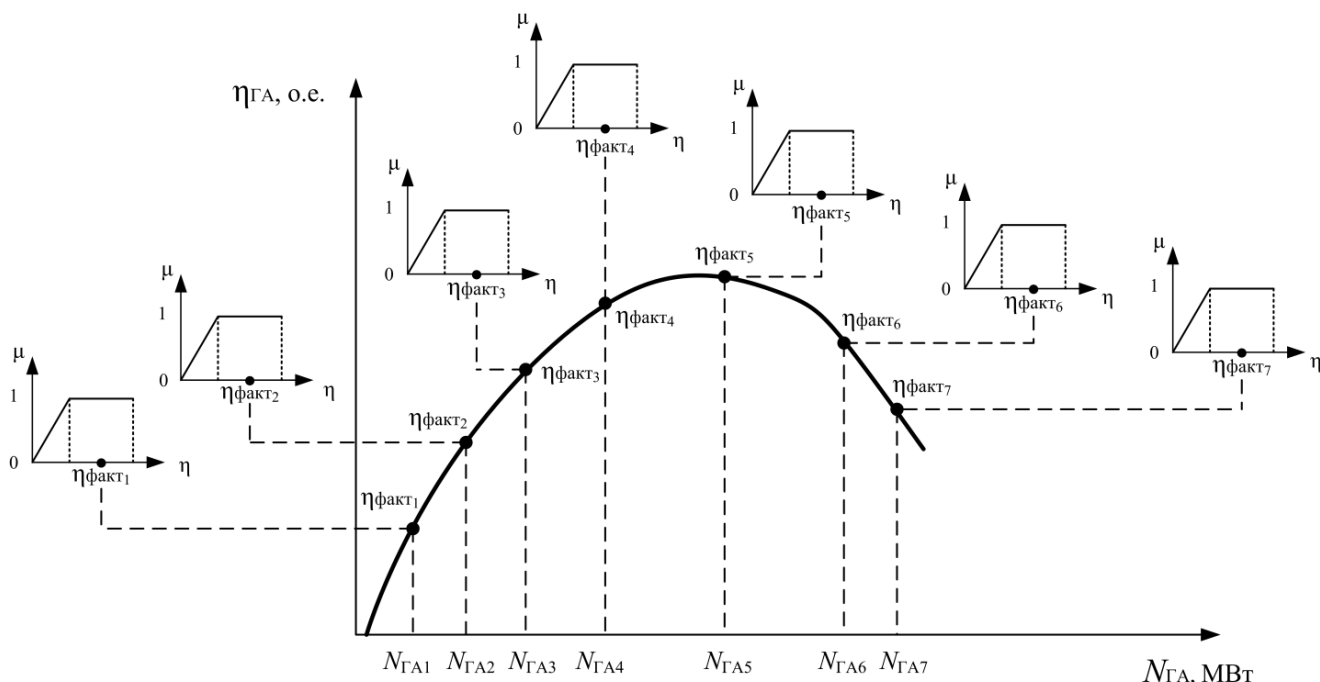


Рисунок 9 – Способ преобразования рабочей характеристики гидроагрегата для получения нечетких интервалов точек КПД

С учетом вышеуказанных замечаний, построение нечеткого интервала показателя экономичности турбины производится в следующей последовательности:

1. На рабочей (универсальной) характеристике турбины агрегата следует определить фактические значения КПД $\eta_{\text{факт}}$ для всего диапазона мощностей турбины (чем меньше интервал между соседними значениями мощности, тем точнее расчет).

2. Необходимо учесть погрешность построения рабочей характеристики агрегата, вызванную погрешностями приборов измерения расхода и напора станции. Погрешность различных приборов варьируется в пределах 2-15%, в отсутствие данных о конкретной ГЭС, примем некую среднюю величину погрешности, равную 6%.

3. Также необходимо учесть изменчивость кривой КПД в сторону её ухудшения, вызванную износом агрегата. Изменчивость характеристик может достигать порядка 2-7%, примем среднюю величину износа, равную 4%.

4. В итоге, получим следующие диапазоны для построения нечеткого интервала:

- $[\eta_{\text{факт}} - 6\%; \eta_{\text{факт}} + 6\%]$ – отрезок *нормальных значений*, в котором лежит значение КПД агрегата с учетом погрешности измерений;
- $[\eta_{\text{факт}} - 10\%; \eta_{\text{факт}} - 6\%)$ - полуинтервал *допустимых значений* КПД агрегата с учетом «старения» рабочей характеристики.

Процесс построения нечёткого интервала в графическом виде показан на рисунке 10.

Далее, перейдем к определению оценки экономичности текущего режима работы. Очевидно, что степень экономичности работы гидроагрегатов выражается в сравнительной оценке их рабочих характеристик, а в нашем случае – нечетких интервалов значений КПД в точках одинаковой мощности. Согласно теории возможностей, сравнение нечетких интервалов предполагает расчет четырёх показателей превосходства:

$\text{Pos}(\bar{Y}_1 \geq \underline{Y}_2)$ – возможность того, что наибольшие значения параметра Y_1 будут по меньшей мере равны наименьшим значениям параметра Y_2 ;

$\text{Pos}(\bar{Y}_1 > \bar{Y}_2)$ – возможность того, что наибольшие значения параметра Y_1 будут больше наибольших значений параметра Y_2 ;

$\text{Nec}(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2)$ – необходимость того, что наименьшие значения параметра Y_1 будут по меньшей мере равны наименьшим значениям параметра Y_2 ;

$\text{Nec}(\underline{Y}_1 > \bar{Y}_2)$ – необходимость того, что наименьшие значения параметра Y_1 будут больше наибольших значений параметра Y_2 .

Поскольку нечеткие интервалы имеют неубывающий вид (см. рисунок 10), расчет будет производиться по следующему выражению, известному в теории возможностей:

$$\text{Nec}(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2) = \max\left(0, \min\left(1, \left(\frac{m_1 - m_2 + \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}\right)\right)\right), \quad (6)$$

где $\text{Nec}(\underline{Y}_1 \geq \underline{Y}_2)$ – необходимость того, что наименьшие значения параметра Y_1 будут по меньшей мере равны наименьшим значениям параметра Y_2 ; $m_1, m_2, \alpha_1, \alpha_2$ – параметрическое описание нечетких интервалов.

Покажем рабочие характеристики рисунка 8 с рассчитанными показателями превосходства по выражению (6) для четырех значений мощности турбины: 15, 30, 45 и 58 МВт. Полученный результат показан на рисунке 11.

Как видно из рисунка 11, показатели превосходства, которые назовем оценками экономичности текущего режима работы гидроагрегатов, в точках одинаковой мощности пропорционально выше для того гидроагрегата, у которого выше КПД в этой точке. В точке пересечения рабочих характеристик (равных КПД) оценка разделилась пополам. Таким образом, делаем вывод, что оценки экономичности текущего режима работы гидроагрегатов не противоречат их рабочим характеристикам. Другими словами, рабочие (универсальные) характеристики могут быть положены в основу расчета оценки экономичности текущего режима работы агрегата, т.е.

$$E(\eta)_{i-j} = \text{Nec}(\underline{Y}_i \geq \underline{Y}_j), \quad (7)$$

где $E(\eta)_{i-j}$ – текущая оценка экономичности режима работы i -го гидроагрегата по сравнению с работой j -го гидроагрегата.

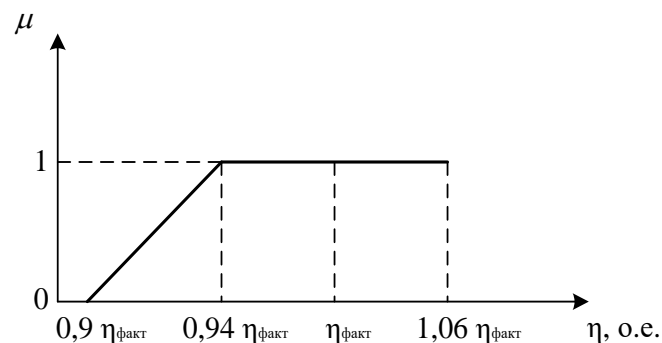


Рисунок 10 – Построение нечеткого интервала характеристики КПД гидроагрегата

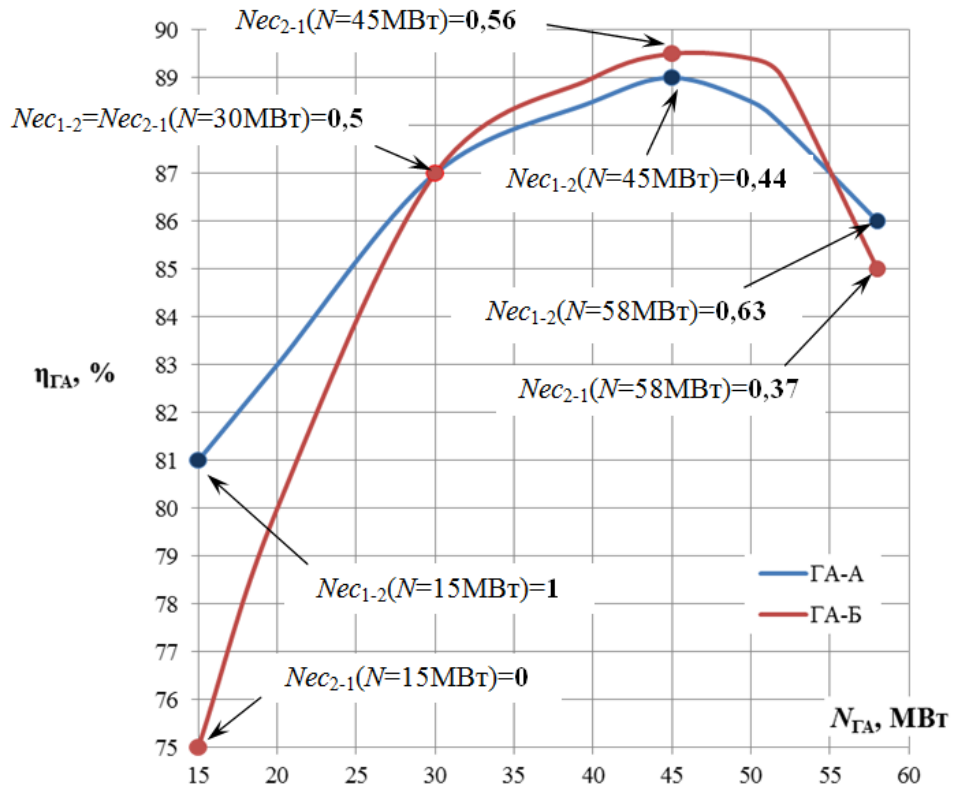


Рисунок 11 – Рабочие характеристики гидроагрегатов с показателями превосходства $Nec(\underline{Y}_i \geq \underline{Y}_j)$

Схематично, процесс расчета оценок экономичности текущего режима работы двух гидроагрегатов при выработке одинаковой мощности представлен на рисунке 12.

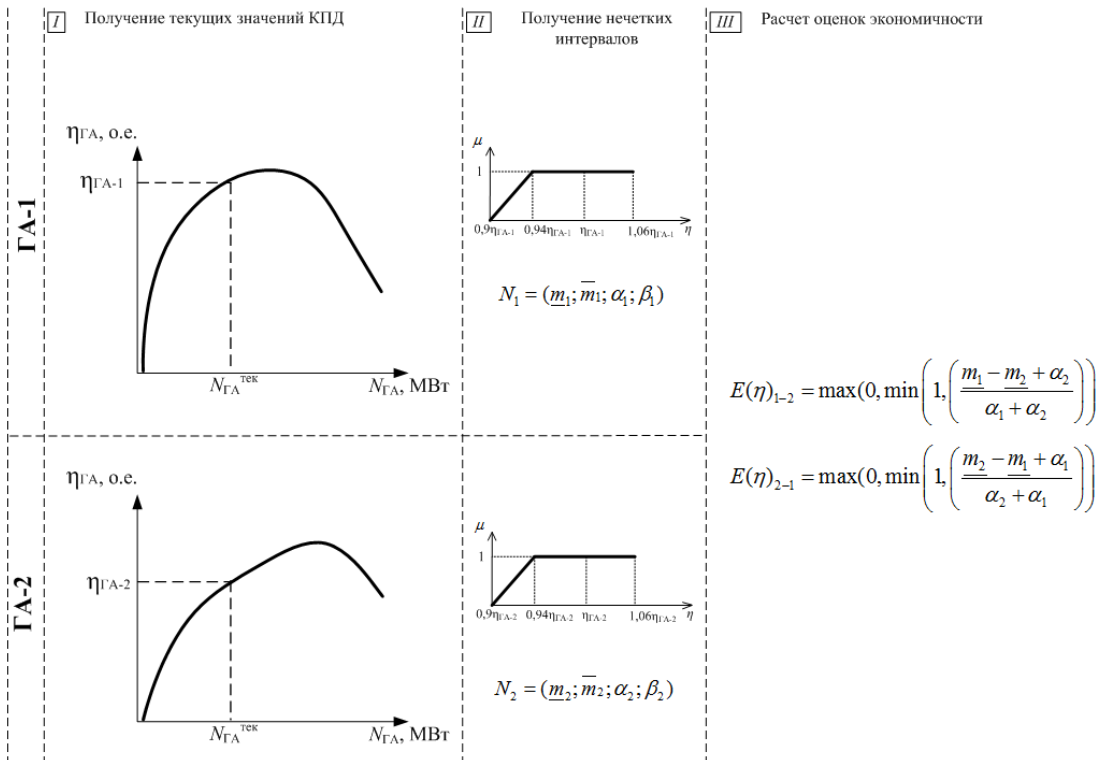


Рисунок 12 – Структурная схема расчета оценок экономичности текущего режима работы гидроагрегатов

Четвертая глава посвящена разработке новых принципов в реализации подсистем СППР и РУСА на гидроэлектростанциях.

Система поддержки принятия решений должна базироваться на следующих *оценках*:

1. $T(\Pi)$ – текущая оценка эксплуатационного состояния агрегата, полученная методом построения обобщенного нечёткого интервала.

2. $E(\eta)$ – текущая оценка экономичности режима работы агрегата, полученная методом сравнительного анализа рабочих характеристик турбин гидроагрегатов.

3. $C(k)$ – комплексная оценка, учитывающая текущее эксплуатационное состояние и экономичность выработки электроэнергии гидроагрегатом и рассчитанная с учетом k – степени приоритетности одного критерия управления над другим.

Рассмотрим возможность практической реализации принципов ситуационного управления для решения задачи многоцелевого управления составом агрегатов на гидростанции с использованием системы СППР, основанной на аппарате теории возможностей.

Предположим, что выбор о включении в работу лежит между двумя гидроагрегатами – ГА-1 и ГА-2, оценки эксплуатационной надежности которых, выраженные значениями функции принадлежности обобщённых нечетких интервалов, равны:

$$T_{ГА-1}^* = 0,27; T_{ГА-2}^* = 0,63.$$

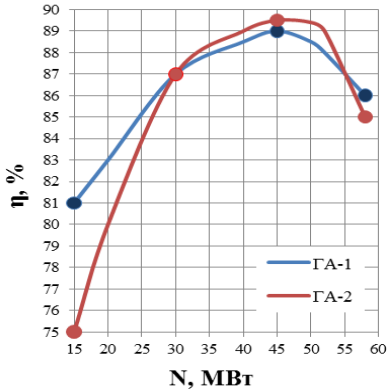
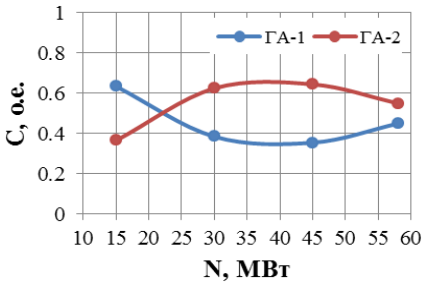
Рабочие характеристики гидроагрегатов соответствуют указанным на рисунке 8. Оценки экономичности текущего режима работы обоих агрегатов рассчитываются по указанному выше алгоритму. Комплексная, или компромиссная, оценка, учитывающая оба оптимизационных критерия, может быть рассчитана по следующему выражению:

$$C_{i-j} = k \cdot T_{i-j} + (1-k) \cdot E_{i-j}, \quad (8)$$

где C_{i-j} – комплексная оценка i -го гидроагрегата по отношению к j -му гидроагрегату; k – коэффициент приоритетности критерия эксплуатационного состояния над экономичностью режима работы; T_{i-j} – оценка эксплуатационного состояния i -го гидроагрегата по сравнению с j -м гидроагрегатом, E_{i-j} – оценка экономичности режима работы i -го гидроагрегата по сравнению с работой j -го гидроагрегата.

Определяющий критерий управления должен быть выбран ЛПР самостоятельно, путём задания коэффициента k . Исходя из этого, ему должны быть предоставлены рассчитанные ситуационные оценки. Приведем пример принятия решения о выборе гидроагрегата в зависимости от требуемой вырабатываемой мощности, которое может принять ЛПР, основываясь на критериях эксплуатационной надежности, экономичности режима работы гидроагрегата или компромиссе между ними. Представим полученную информацию в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Таблица альтернативных решений о выборе гидроагрегатов

Критерий управления	Значения оценок ГА-1/ГА-2		Решение о включении гидроагрегата и его загрузки
Эксплуатационная надежность	0,27/0,73		15–60 МВт – ГА-2
Экономичность режима работы	<i>N</i> , МВт	Оценка E_{i-j}	 <p>15–30 МВт – ГА-1 30–55 МВт – ГА-2 55–60 МВт – ГА-1</p>
	15	1/0	
	30	0,5/0,5	
	45	0,44/0,56	
	58	0,63/0,37	
Эксплуатационная надежность и экономичность работы	<i>N</i> , МВт	Оценка C_{i-j} по выражению (8) при $k=0,5$	 <p>15–22 МВт – ГА-1 22–58 МВт – ГА-2</p>
	15	0,635/0,365	
	30	0,385/0,625	
	45	0,355/0,645	
	58	0,45/0,55	

Как видно из таблицы 1, рекомендации системы СППР о вводе в работу каждого из гидроагрегатов в зависимости от требуемой мощности могут быть различными и зависят от выбранного ЛПР критерия управления станцией – работе по критерию максимальной эксплуатационной надёжности, максимально возможной экономичности или исходя из компромисса между ними.

Оптимизация состава гидроагрегатов происходит по методу направленного перебора вариантов с использованием рабочих характеристик турбин гидроагрегатов. Процесс выбора стационарных номеров агрегатов происходит по критерию максимального среднего КПД станции и схематично представлен на рисунке 13 а. Добавление к расчету учета текущего эксплуатационного состояния гидроагрегатов в виде ранжированного ряда по уменьшению оценки $T(\Pi)$ позволит получать набор стационарных номеров гидроагрегатов с позиции компромисса надёжности и экономичности выработки. Эта процедура представлена на рисунке 13 б с учетом того, что ранжированный ряд гидроагрегатов выглядит так: ГА-2, ГА-3, ГА-1. Сформулируем алгоритм оптимизации.

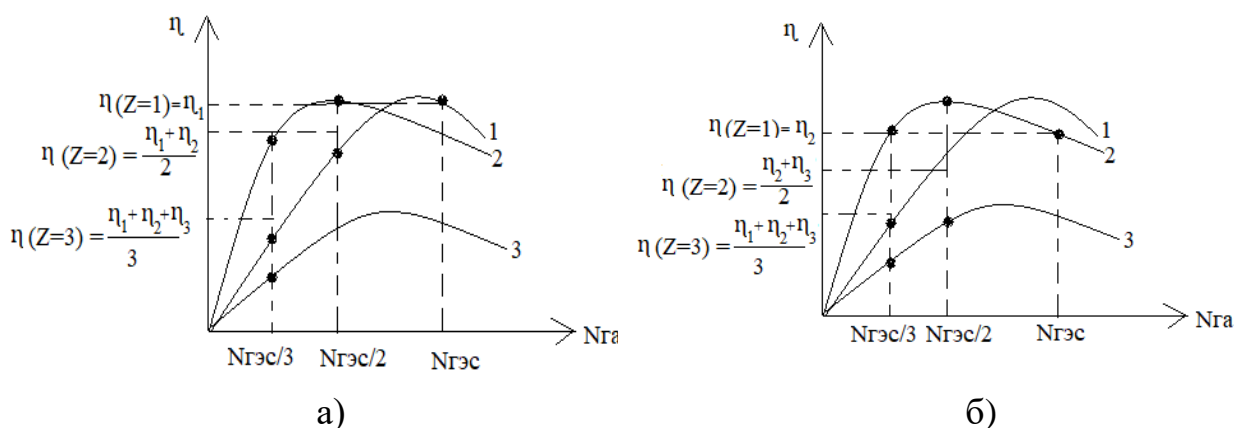


Рисунок 13 – Определение оптимального состава агрегатов:

а) без учета текущего состояния ГА; б) с учетом текущего состояния ГА

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ГИДРОАГРЕГАТОВ НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

1. Получение исходной информации с датчиков защит ГА.
2. Перевод параметров ГА из именованных единиц в относительные.
3. Расчет значений функций принадлежности параметров ГА.
4. Получение ранжированного ряда гидроагрегатов на основе оценки их текущего состояния ГА. Производится построение обобщённых нечётких интервалов агрегатов и получение оценок $T(\Pi)$. Далее производится ранжирование агрегатов от самого надёжного к менее надёжному.
5. Определение оптимального состава и загрузки ГА методом направленного перебора вариантов. Используется метод направленного перебора вариантов с учетом оценки текущего состояния гидроагрегатов. Данный метод учитывает и надежность, то есть текущее состояние гидроагрегата в темпе производственного процесса и экономичность режима, тем самым осуществляя многокритериальную оптимизацию на станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы отражены в следующих положениях:

1. Рассмотрены процессы оптимизации и принятия решений на гидроэлектростанции, на основании чего предложено использование подсистем СППР и РУСА в качестве диалоговых информационных систем мониторинга технического состояния оборудования, инструмента превентивного управления агрегатами и способа реализации многокритериального управления ими.
2. Показана возможная реализация подсистем СППР и РУСА на основе методов теории возможностей.
3. Описан порядок преобразования параметров оборудования ГЭС в вид нечетких интервалов, визуализирующих все возможные состояния каждого из параметров: нормальное, допустимое, аварийное.
4. Описана процедура перевода эксплуатационных параметров в разряд безразмерных величин по правилам масштабирования, что позволяет учитывать каждый из них в процессе определения текущего технического состояния оборудования.

5. Разработан метод оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата (гидроблока) путём построения обобщённого нечеткого интервала. Показано, что данный метод отличается от предлагаемых ранее большей степенью объективности, наглядностью и быстродействием расчетов.

6. Разработан метод оценки экономичности текущего режима работы агрегата на основе анализа его энергетических характеристик. Данный метод позволяет учитывать изменчивость зависимости КПД турбины, что важно ввиду отсутствия достоверной информации о текущем характере состояния этой кривой.

7. Получены модели прототипов систем СППР и РУСА в программной среде MatLAB, призванные осуществлять функции получения текущей информации о состоянии датчиков защит агрегатов, её обработку и наглядное представление ЛПР для анализа и принятия на его основе управленческих решений.

8. Показано, что использование подобных систем на ГЭС способствует повышению надежности работы оборудования, увеличению сроков межремонтных периодов, экономии первичного энергоносителя и, как следствие, эффективности работы в целом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, из перечня рекомендуемых ВАК:

1. **Панова, Я. В.** Система поддержки принятия решений для управления составом агрегатов ГЭС [Текст] / Ю. А. Секретарев, А. А. Жданович, С. В. Митрофанов, Я. В. Панова // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 18-24.

2. **Панова, Я. В.** Моделирование информационной базы управления оборудованием ГЭС [Текст] / А. А. Жданович, С. В. Родыгина, В. В. Дербенев, Я. В. Панова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 1. – С. 51-60.

3. **Панова, Я. В.** Исследование возможности применения обобщенного нечеткого интервала для анализа эксплуатационного состояния оборудования на гидроэлектростанциях [Электронный ресурс] / Ю. А. Секретарев, Я. В. Панова // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2017. – № 7. – С. 17-29.

4. **Панова, Я. В.** Анализ критериев управления гидроагрегатов с использованием оценок их текущего состояния [Электронный ресурс] / Ю. А. Секретарев, Я. В. Панова // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2018. – № 9. – С. 33-42.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Свидетельство № 2019619681 Российская Федерация. Определение оптимальных режимов работы гидроагрегатов на ГЭС с учётом параметров их текущего состояния : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / **Я. В. Панова**, Ю. А. Секретарев, А. А. Ачитаев ; заявитель и правообладатель Федер. гос. бюджетн. образоват. учреждение высш. обр. Новосиб. гос. техн. ун-т. - № 2019618687 ; заявл. 16.07.2019 ; зарегистр. 23.07.2019. - 1 с.

6. Свидетельство № 2019619718 Российская Федерация. Оптимизация состава гидроагрегатов на ГЭС с использованием методов теории возможностей : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / **Я. В. Панова**, Ю. А. Секретарев, А. А. Ачитаев ; заявитель и правообладатель Федер. гос. бюджетн. образоват. учреждение высш. обр. Новосиб. гос. техн. ун-т. - № 2019618636 ; заявл. 15.07.2019 ; зарегистр. 24.07.2019. - 1 с.

В других изданиях:

7. **Panova Y. V.** Investigations of Possible Using a Generalized Fuzzy Interval for Analyzing Operating Conditions of Power Equipment at Hydropower Plants [Text] / Y. A. Sekretarev, Y. V. Panova // 2 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). – Chelyabinsk : IEEE, 2016. (*индексирована в Scopus и Web of Science*).

8. **Panova Y. V.** Development of the Intelligent Decision Support System for Situation Management of Hydro Units [Text] / Y. V. Panova, Y. A. Sekretarev, // 14th International Scientific-Technical Conference (APEIE) : proc. Novosibirsk, 2–6 October 2018. – IEEE, 2018, pp. 384-388. – ISBN 978-1-5386-7054-5. - DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545123 (*индексирована в Scopus*).

9. **Panova Y.** The Operating Condition Estimation of the Equipment in Decision-Making Process in the Hydro Power Plant Control / Y. Panova, A. Zhdanovich, V. Derbenev [Text] // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM-2014. – P. 785-789.

10. **Панова, Я. В.** Исследование возможности интеллектуального анализа данных о состоянии гидроагрегата [Текст] / Я. В. Панова, А. А. Жданович // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. – Саяногорск, 2014. – С. 249-254.

11. **Панова, Я. В.** Определение базовых оценок эксплуатационных параметров оборудования ГЭС [Текст] / Я. В. Панова // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 11 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 90-95.

12. **Панова, Я. В.** Организация превентивного управления гидроэлектростанцией с применением системы поддержки принятия решений [Текст] / Я. В. Панова, Ю. А. Секретарев // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 2 Всерос. науч. практ. конф. – Саяногорск : Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2015. – С. 315–319.

13. **Панова, Я. В.** Превентивное управление на ГЭС с позиции применения системы поддержки принятия решений [Текст] / Я. В. Панова ; науч. рук. Ю. А. Секретарев // Электроэнергетика. Энергия – 2015 : сб. трудов 10 Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Иваново : ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2015. – Т. 3. – С. 233-235.

14. **Панова, Я. В.** Получение ситуационных оценок эксплуатационного состояния гидроагрегатов [Текст] / Я. В. Панова ; науч. рук. Ю. А. Секретарев // Электроэнергетика. Энергия – 2016. 11 междунар. науч.–техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных Иваново, 5-7 апр. 2016 г. : материалы конф. В 7 т. –

Иваново : ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2016. – Т. 3. – С. 219-220.

15. **Панова, Я. В.** Оценка текущего эксплуатационного состояния гидроагрегата [Текст] / Я. В. Панова ; науч. рук. Ю. А. Секретарев // МНСК-2016: материалы Междунар. науч. студ. конф. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 30.

16. **Панова, Я. В.** Принципы формирования оценки технического состояния оборудования ГЭС [Текст] / Я. В. Панова ; науч. рук. Ю. А. Секретарев // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 48-50.

17. **Panova J. V.** Auswertung des Betriebszustandes von Hydraulikeinheiten aufgrund der Fuzzylogik / J. V. Panova ; wissenschaftlicher betreuer Ju. A. Sekretarev, sprachbetreuerin M. A. Morozova // *Aspire to science* : материалы гор. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 12 апр. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 437–439. - 25 copy - ISBN 978-5-7782-3238-9.

18. **Панова, Я. В.** Оценка экономической эффективности работы гидроагрегата на основе теории возможностей [Текст] / Ю. А. Секретарев, Я. В. Панова // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 4 Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, специалистов, аспирантов и студентов. – Саяногорск ; Черемушки : Сиб. федер-ный ун-т ; Саяно-Шуш. фил., 2017. – С. 107-112.

19. **Панова, Я. В.** Подход к созданию подсистемы управления составом гидроагрегатов на ГЭС на базе элементов теории нечетких множеств (нечеткой логики) [Текст] / Ю. А. Секретарев, Я. В. Панова // Борисовские чтения : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Красноярск : Сиб. федер-ный ун-т, 2017. – С. 198–201.

20. **Панова, Я. В.** Использование энергетических характеристик турбины гидроагрегата для оценки экономической эффективности его работы [Текст] / Я. В. Панова ; науч. рук. Ю. А. Секретарев // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 74-78.

21. **Панова, Я. В.** Оценка надежности и экономичности гидроагрегатов при ситуационном управлении на ГЭС [Текст] / Я. В. Панова, Ю. А. Секретарев // Гидроэлектростанции в XXI веке : сб. материалов 5 Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных, специалистов, аспирантов и студентов. – Саяногорск ; Черемушки : Сиб. федер-ный ун-т ; Саяно-Шуш. фил., 2018. – С. 55-62.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 1425. Подписано в печать 17.10.2019 г.