

*На правах рукописи*



**ЛОНШАКОВ Никита Андреевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ  
С ТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ**

Специальность: 05.14.14–Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена на кафедре «Атомные электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент **Горбунов Владимир Александрович**

**Официальные оппоненты:**

**Хоменок Леонид Арсеньевич**, доктор технических наук, профессор, ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», заведующий аналитическим отделом главных научных сотрудников;

**Рогалев Андрей Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заведующий кафедрой «Инновационные технологии наукоемких отраслей».

**Ведущая организация**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «05» июня 2020 г. в 11.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен:

[http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Lonshakov\\_N.A.\\_0.pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Lonshakov_N.A._0.pdf)

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

И.о. учёного секретаря  
диссертационного совета Д 212.064.01



Бушуев Евгений Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Повышение эффективности оборудования собственных нужд тепловых электрических станций обеспечивает уменьшение удельных затрат топлива при неизменном количестве отпускаемой электроэнергии от ТЭС. Повышение эффективности посредством модернизации морально устаревшего вспомогательного оборудования оказывает положительное влияние на безопасность и надежность работы энергоблока в целом. Основными потребителями энергии собственных нужд крупных тепловых электростанций являются питательные турбонасосы (ПТН), предназначенные для подачи питательной воды через регенеративные подогреватели к парогенератору. Потребление энергии ПТН при этом составляет 2,1–6% от общей мощности энергоблока.

Эффективность работы питательных турбонасосов определяется по ряду критериев: удельному расходу тепловой энергии брутто на перекачку питательной воды, КПД. В конечном счете, показатели работы ПТН влияют на эффективность работы энергоблока в целом, определяемую по удельному расходу условного топлива на отпуск электроэнергии, КПД нетто. Средневзвешенный удельный расход условного топлива на отпуск электрической энергии на отечественных ТЭС в 2019 г. составил 299,9 гу.т./(кВт·ч). Аналогичный показатель в странах с развитой системой оптимизации издержек на производство электроэнергии достигает 256,9 гу.т./(кВт·ч).

Конденсационные энергоблоки электрических станций мощностью 300 МВт и более, а также большинство энергоблоков АЭС оснащены питательными турбонасосами, разработанными в 60-70-х годах прошлого века в соответствии с уровнем научно-технологического развития того времени. Повышение эффективности морально устаревшего тепломеханического оборудования электростанций возможно за счет изменения конструктивных элементов или внесения коррективов в режимы работы агрегатов посредством комплексного влияния на технологические условия их эксплуатации.

Современная тенденция, направленная на повышение выработки электроэнергии действующих предприятий энергетики, вынуждает отступать от базовых проектных режимов эксплуатации оборудования станции. Так, электрическая мощность трех энергоблоков Пермской ГРЭС увеличена с 800 МВт до 820 МВт, электрическая мощность двух энергоблоков Калининской АЭС увеличена с 1000 МВт до 1070 МВт. Подобные мероприятия приводят к повышению расхода питательной воды, перекачиваемой питательными турбонасосами. Данная тенденция находит поддержку на законодательном уровне. Принимаются как международные стандарты, например ISO 50001-2011 «Система энергетического менеджмента», так и федеральные законы, такие как № 261-ФЗ «Об энергосбере-

жении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Таким образом, актуальной задачей является создание обоснованной методики для оценки эффективности работы питательных турбонасосов в различных эксплуатационных режимах, что позволит спрогнозировать изменение работы каждого ПТН, подобрать комплекс варьируемых эксплуатационных параметров, при котором ПТН работает с наибольшей эффективностью.

**Степень разработанности темы диссертации.** Значимые результаты в области анализа и повышения эффективности работы питательных насосов отражены в работах Богуна В.С., Демьянова В.А., Шиль Ю.Х.; в области модернизации режимов работы приводных турбин серьезный вклад внесли Хоменок Л.А., Прокопец А.О., Иноземцев А.А. и другие. Однако остается неизученным ряд важных аспектов, затрагиваемых темой работы. В частности: в существующей методике определения удельного расхода тепловой энергии брутто на питательные турбонасосы количество тепла, отдаваемое отработавшим паром в конденсаторе ПТН, определяется расчетом или при заводских испытаниях нового оборудования и остается неизменным, при этом не учитывается изменение заводских характеристик ПТН вследствие износа и старения оборудования; не определена степень частного влияния отдельных параметров на эффективность работы питательных турбонасосов; отсутствуют рекомендации по распределению мощности между параллельно работающими питательными турбонасосами, обладающими различной эффективностью в режимах частичной нагрузки энергоблока.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности питательных насосов с турбинным приводом путем разработки и научного обоснования режимных и конструктивных мероприятий.

**Задачи диссертационной работы**, которые должны быть решены для достижения цели:

1. Анализ существующих режимов и условий эксплуатации питательных турбонасосов на основе экспериментальных данных, полученных в ходе длительной работы действующего оборудования.

2. Анализ существующих способов оценки и повышения эффективности питательных турбонасосов на основе данных, полученных со штатных контрольно-измерительных приборов электростанции.

3. Разработка новой методики оценки эффективности работы питательных турбонасосов с использованием нейросетевого моделирования действующих ПТН на основе эксплуатационных данных, получаемых со штатных контрольно-измерительных приборов на протяжении длительного периода эксплуатации.

4. Сравнение разработанной и существующих методик оценки эффективности питательных турбонасосов.

5. Разработка программных комплексов оценки эффективности питательных турбонасосов с применением нейросетевого моделирования.

6. Определение способов повышения эффективности питательных турбонасосов за счет конструктивного совершенствования регулирующего клапана приводной турбины.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».** Работа соответствует паспорту специальности: в части *формулы* специальности: «...исследования по существенным особенностям технических ... процессов, характерных для систем, установок и агрегатов, связанных единым технологическим циклом производства тепла ... на тепловых электростанциях, включая проблемы совершенствования действующих ... технологий производства электрической энергии и тепла...»; «...проводятся работы по совершенствованию действующих ... типов и конструкций ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций...»; «...поиск приемов и методов оптимизации рабочих режимов оборудования...».

Представленные в диссертационной работе научные положения соответствуют *области исследований специальности 05.14.14* по следующим пунктам:

– *п. 1 «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом»:* предложенная методика оценки и способы повышения эффективности ПТН с использованием нейросетевого моделирования позволили установить качественную и количественную зависимость эффективности ПТН от его эксплуатационных параметров, что в дальнейшем позволило определить пути режимной оптимизации работы питательных турбонасосов;

– *п.2 «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»:* на основе нейросетевой технологии построены математические модели ПТН с использованием эксплуатационных данных, учитывающие особенности технологических процессов, протекающих в каждом отдельном агрегате, и техническое состояние оборудования;

– *п. 4 «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования»:* проведен анализ конструкции регулирующего клапана приводной турбины питательного насоса, проведена оценка его гидравлического совершенства, предложены варианты модернизации конструкции регулирующего клапана для повышения эффективности ПТН в целом.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана основанная на нейросетевой технологии и реальных эксплуатационных данных методика оценки эффективности питательных насосов с турбинным приводом, позволяющая учесть техническое состояние каждого отдельного агрегата и характерные режимы его эксплуатации, что обеспечивает возможность обоснованного определения индивидуальных способов повышения эффективности питательных насосов с турбинным приводом.

2. Предложен технически обоснованный способ разработки нормативного удельного расхода тепловой энергии брутто на приводные турбины питательных турбонасосов конденсационного типа, не требующий проведения испытаний на действующем оборудовании.

3. Предложен новый способ установления количественной зависимости показателей эффективности питательных насосов с турбинным приводом от эксплуатационных параметров, позволяющий повысить точность прогнозирования показателей работы турбонасосов в различных режимах.

**Теоретическая значимость** результатов работы заключается в следующем:

1. Установлено и проанализировано влияние эксплуатационных параметров на эффективность работы питательных турбонасосов, что позволило создать их цифровые двойники в диапазоне изменения параметров, характерных для режимов работы реального объекта.

2. Разработан алгоритм определения показателей эффективности работы приводной турбины действующих питательных турбонасосов на основе нейросетевого моделирования.

3. Доказана эффективность применения нейросетевого моделирования для создания статистических моделей питательных турбонасосов по сравнению с регрессионным анализом и детерминированным моделированием.

4. Составлена математическая модель регулирующего клапана приводной турбины, на основе которой определено гидравлическое сопротивление по ходу пара в клапане. Выявлены пути снижения потерь давления в регулирующем клапане.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в следующем:

1. Получен набор статистических эксплуатационных данных по питательным турбонасосами предложена методика оценки и прогнозирования их характеристик в расчетном диапазоне рабочих параметров для повышения эффективности турбонасосов.

2. Разработаны программные комплексы, позволяющие реализовать возможности созданных математических моделей питательных турбонасосов.

3. Предложены и научно обоснованы конструктивные и режимные мероприятия, позволяющие уменьшить затраты энергии на питательные турбонасосы.

4. Проведен сравнительный анализ эффективности нескольких питательных турбонасосов одного энергоблока, в результате которого сформулированы рекомендации по выбору насоса для эксплуатации в режимах частичной нагрузки энергоблока.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки эффективности питательных турбонасосов на основе статистических эксплуатационных данных.

2. Обоснования преимущества предложенной методики оценки эффективности питательных турбонасосов на основе нейросетевого моделирования в сравнении с другими методиками.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению эффективности работы питательных турбонасосов электрических станций.

4. Технически обоснованные нормативы удельного расхода тепловой энергии брутто на питательные турбонасосы с приводной турбиной конденсационного типа.

5. Программные комплексы для определения и прогнозирования эффективности питательных турбонасосов на основе нейросетевого моделирования.

6. Усовершенствованные конструкции проточной части регулирующего клапана системы парораспределения приводных турбин для повышения эффективности питательных турбонасосов.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены на международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (ИГЭУ, Иваново, 2014–2019 гг.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, Москва, 2016 г.); международных конференциях «Бенардосовские чтения» (ИГЭУ, Иваново, 2015, 2017, 2019 гг.); международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (ИГЭУ, Иваново 2015 г.); международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» (КГЭУ, Казань, 2015 г.); научно-практическом семинаре «Расчетно-экспериментальное обоснование новых технических решений в атомной отрасли» (НГТУ им. Алексеева, Нижний Новгород, 2017); школе-конференции молодых атомщиков Сибири (ТПУ, Томск, 2015-2016 гг.); международной научной конференции «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-31» (БНТУ, Минск, 2018 г.); международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (НИЯУ МИФИ, Обнинск 2018 г.); международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (АО «Концерн Росэнергоатом», Москва, 2018 г.).

**Практическая реализация результатов работы.** Результаты работы внедрены в промышленную эксплуатацию на энергоблоках №1 и №2 Калинин-

ской АЭС, а также приняты к рассмотрению на Костромской ГРЭС, что подтверждается двумя актами внедрения.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается применением апробированных методов и программных средств моделирования и анализа работы тепломеханического оборудования и систем; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации ряда питательных турбонасосов и с использованием стандартизованных методов и поверенных средств измерения параметров; совпадением в пределах погрешности результатов математического моделирования с фактическими эксплуатационными данными по работе оборудования; согласованностью результатов работы с опубликованными данными других авторов.

**Методология и методы** исследования определяются целью и задачами работы, сложившимися научными подходами и направлены на повышение эффективности питательных турбонасосов режимными и конструктивными методами. Методология состоит в разработке технологии анализа и повышения эффективности питательных турбонасосов на основе применения нейросетевого моделирования энергетического оборудования и систем. В работе эффективно использованы также методы регрессионного анализа, вычислительной гидродинамики, расчета технико-экономических показателей оборудования электростанций.

**Личный вклад автора** состоит в сборе, анализе и обработке экспериментальных данных; расчете показателей эффективности; разработке и проверке методики повышения эффективности питательных турбонасосов, а также определении технически обоснованного нормативного удельного расхода тепловой энергии брутто на питательные турбонасосы: построении нейросетевых моделей насосных агрегатов, проверке результатов моделирования на корректность и непротиворечивость физическим процессам в исследуемом оборудовании; создании программных комплексов; построении и расчете трехмерных моделей оборудования в САД и САЕ программных пакетах; подготовке публикаций по тематике работы.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 23 печатных работы, в том числе 4 статьи в изданиях по перечню ВАК, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 17 тезисов и полных текстов докладов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 164 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и 2 приложений. Основной текст объемом 157 страниц содержит 79 рисунков и 36 таблиц.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** рассмотрена история развития тематики исследования и аналогичных ему работ. Определено основное направление по повышению эффективности питательных турбонасосов, заключающееся в улучшении качества работы питательного турбонасоса в целом и его составных частей: приводной паровой турбины, системы регулирования. Рассмотрены основные используемые методы совершенствования работы энергетического оборудования: внесение конструктивных изменений в действующее морально устаревшее оборудование окажет наибольший технико-экономический эффект, однако реализация данного мероприятия потребует значительных капитальных затрат. Для оценки качества и возможности улучшения режимов работы оборудования необходим анализ опыта его эксплуатации, а также проведение экспериментальных работ по верификации разработанных решений. Для анализа опыта эксплуатации питательных турбонасосов могут быть использованы данные как со штатных контрольно-измерительных приборов электростанции, так и информация, получаемая со специализированной аппаратуры, дополнительно устанавливаемой на действующее оборудование. Верификация предложенных методик посредством испытания на действующем оборудовании также затруднена вследствие возникновения больших экономических потерь от останова технологического процесса на время испытаний. Поэтому при разработке новой методики анализа и повышения эффективности питательного турбонасоса, а также для определения технически обоснованных норм расхода энергии необходимо отталкиваться от моделирования режимов работы питательных турбонасосов на основе реальных эксплуатационных данных, получаемых со штатных контрольно-измерительных приборов электростанции.

Проведен сравнительный анализ известных способов моделирования, которые могут использоваться в разрабатываемой методике повышения эффективности работы ПТН. Среди известных способов моделирования выделены: классический регрессионный анализ, численное моделирование на основе детерминированных подходов, физический модельный эксперимент, активный натурный эксперимент, нейросетевое моделирование (табл. 1).

По результатам анализа выявлено, что нейросетевое моделирование обладает достаточной точностью для дальнейшего применения в разрабатываемой методике, не требуя при этом значительных материальных затрат. По сравнению с регрессионным анализом, в нейросетевом моделировании не требуется подбор вида исходной функции, позволяет получить результат с большей степенью точности.

Таблица 1– Сравнение известных подходов к моделированию работы оборудования и систем

Критерий сравнения	Регрессионный анализ	Детерминированный подход к моделированию	Физический модельный эксперимент	Активный натурный эксперимент	Нейросетевое моделирование
Стоимость создания модели	Относительно небольшая стоимость инструмента моделирования	Дорогие инструменты моделирования,	Наибольшая стоимость модели по сравнению с другими методами моделирования	Создание отдельной модели не требуется	Относительно небольшая стоимость инструмента моделирования
Стоимость работы с моделью	Минимальная стоимость работы с моделью	Работа с моделью требует дорогостоящих вычислительных систем высокой мощности	Для работы модели требуется генерация пара высоких параметров с последующей конденсацией	Работы с моделью потребует разгрузку энергоблока до 50% мощности от номинальной, огромные экономические потери	Минимальная стоимость работы с моделью
Трудоемкость создания модели	Для обработки большой выборки данных требуется детальный анализ материалов специалистами высокого уровня квалификации	Тщательная подготовка исходных данных, длительная работа специалистов высокого уровня квалификации	Наиболее трудоемкий метод создания модели оборудования, связанный с обработкой больших объемов конструкционных материалов	Требуется разработка программы исследования, использование дорогостоящих средств измерения параметров	Требуется работа специалистов высокого уровня квалификации, однако разбивка объемной выборки не требуется
Диапазон исследуемых параметров	Диапазон параметров ограничен используемой выборкой данных	Широкой диапазон изменения исследуемых параметров	Диапазон изменения параметров ограничен генерируемыми мощностями	Диапазон изменения параметров ограничен конструктивными возможностями оборудования	Диапазон параметров ограничен используемой выборкой данных
Точность моделирования	Высокая точность в диапазоне выборки параметров	Точность результатов зависит от количества учтенных факторов работы оборудования	Точность результатов приближена к натурному эксперименту	Наибольшая точность результатов	Высокая точность в диапазоне выборки параметров

**Вторая глава** посвящена разработке новой методики оценки эффективности питательных турбонасосов и определению технически обоснованных нормативов расхода тепловой энергии брутто на ПТН (рис.1). Проводится анализ, обработка и подготовка материалов для дальнейшего исследования.

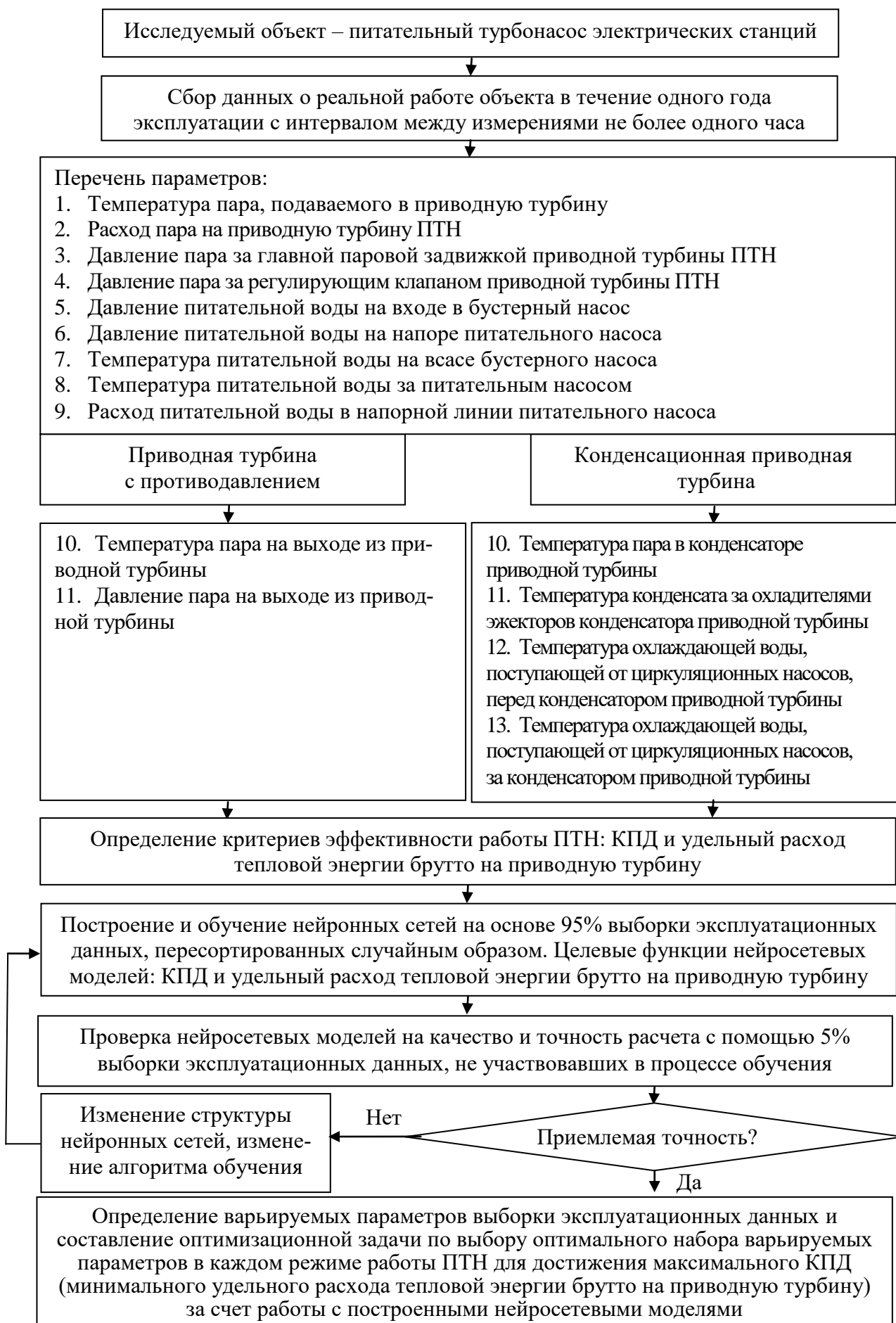


Рисунок 1 – Разработанная методика повышения эффективности питательных насосов

Разработанная методика отличается от известных тем, что позволяет повысить эффективность ПТН и определить нормативный удельный расход тепловой энергии брутто на приводную турбину на основе реальных эксплуатационных данных по работе питательного турбонасоса, а не по паспортным характеристикам оборудования. За счет использования реальных данных, подобранные комплексы варьируемых параметров являются индивидуальными и косвенно учитывают особенности работы и техническое состояние каждого отдельного ПТН. Применение нейронных сетей в качестве инструмента моделирования позволяет получить результаты с точностью не ниже 97%, при этом скорость отклика нейросетевой модели позволяет производить анализ эффективности и вносить коррективы в работу оборудования в режиме реального времени.

Для апробирования разработанной методики в качестве объекта исследования выбраны четыре ПТН с конденсационной приводной турбиной, находящихся в режиме нормальной эксплуатации на действующем энергоблоке электростанции.

Данные ПТН обладают типовой схемой включения для подобного оборудования на тепловых и атомных электрических станциях: питательная вода подается на предвключенный (бустерный) насос, в котором создается необходимый подпор на входе в питательный насос, а после ПТН направляется в систему регенерации высокого давления. Пар на приводную турбину поступает из отбора энергетической турбины. Отработанный пар направляется в конденсатор приводной турбины, отвод конденсата из которого производится непосредственно в конденсатор энергетической турбины. Подобная схема включения ПТН применяется на энергоблоках с турбоустановками К-500-240, К-800-240, К-1200-240, К-1000-60/1500, К-1000-60/3000 и др.

Исследуемый питательный турбонасос состоит из следующих элементов:

- приводная турбина ОК-12А Калужского турбинного завода, номинальной мощностью 11680 кВт,
- главный питательный насос ПТ-3750-75 с номинальными подачей питательной воды 3760 м<sup>3</sup>/ч и напором 8,24 МПа,
- бустерный насос 400-QND-spec с номинальными подачей питательной воды 3800 м<sup>3</sup>/ч и напором 2,19 МПа,
- редуктор Р-2, эжекторы и другое оборудование.

Для сбора данных по фактической эксплуатации питательных турбонасосов электростанции проводились замеры технологических параметров с 01.11.2017 по 1.05.2019. Временной интервал между замерами варьировался в диапазоне от 14 до 40 минут. Запись необходимых режимных параметров осуществлялась с использованием автоматизированной системы управления энергоблока.

На основе информации о приборах измерения тепломеханических параметров выполнена метрологическая обработка экспериментальных данных; определены погрешности измерения каждого параметра и суммарная погрешность всего комплекса замеров, составившая  $\pm 4,8\%$ .

Всего было проанализировано свыше 30000 значений каждого контролируемого параметра по каждому ПТН.

В **третьей** главе приведены результаты моделирования работы питательных турбонасосов с применением предложенной методики.

В качестве критериев эффективности работы питательных турбонасосов, в соответствии с методикой, приняты:

- удельный расход тепловой энергии брутто на приводную турбину в расчете на килограмм питательной воды (кДж/кг);
- термодинамический коэффициент полезного действия питательного турбонасоса.

Термодинамический коэффициент полезного действия питательного турбонасоса определен по формуле 1:

$$\eta_{\text{ПТН}} = \frac{Q_{\text{п.в.}}(P_{\text{н}}^{\text{п.в.}} - P_{\text{в}}^{\text{п.в.}})}{G_{\text{наПТН}}^{\text{п}}(h_{\text{н}} - ct_{\text{к}})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $G_{\text{наПТН}}^{\text{п}}$  – расход пара на ПТН, кг/с;  $h_{\text{н}}$  – энтальпия пара, подаваемого на привод ПТН, кДж/кг;  $ct_{\text{к}}$  – энтальпия конденсата в конденсаторе ПТН, кДж/кг;  $(P_{\text{н}}^{\text{п.в.}} - P_{\text{в}}^{\text{п.в.}})$  – разница давлений питательной воды на напоре питательного и на всасе бустерного насосов, кПа;  $Q_{\text{п.в.}}$  – расход питательной воды через ПТН, м<sup>3</sup>/с.

Данный показатель удобен тем, что на основе доступных эксплуатационных данных отражает эффективность работы всего агрегата в целом, не требуя при этом отдельного определения КПД его составных частей.

На основе полученной информации для всех четырех питательных турбонасосов определены значения КПД и удельного расхода тепловой энергии брутто в диапазоне их нормальной эксплуатации (таблица 2).

Таблица 2– Удельный расход тепловой энергии брутто на перекачку питательной воды и термодинамический КПД ПТН

Параметр	Диапазон изменения
1. Удельный расход тепловой энергии брутто на ПТН №1, кДж/кг	44,22– 55,77
2. Удельный расход тепловой энергии брутто на ПТН №2, кДж/кг	42,80– 54,85
3. Удельный расход тепловой энергии брутто на ПТН №3, кДж/кг	48,61– 58,13
4. Удельный расход тепловой энергии брутто на ПТН №4, кДж/кг	42,30–61,09
5. Термодинамический КПД ПТН №1, %	12,81 – 15,83
6. Термодинамический КПД ПТН №2, %	13,55 – 16,09
7. Термодинамический КПД ПТН №3, %	12,24–14,88
8. Термодинамический КПД ПТН №4, %	11,01 – 16,05

Для оценки правильности полученных величин КПД выполнено их сопоставление со значением КПД, рассчитанным по паспортным значениям КПД составных частей ПТН в базовом режиме работы насоса:

$$\eta_{\text{ПТН}} = \eta_{\text{п.в.}} \cdot \eta_{\text{с.р.к.}} \cdot \eta_{\text{т.у.}} \cdot \eta_{\text{п.н.}} \cdot \eta_{\text{б.н.}} \cdot \eta_{\text{ред.}} = (0,995 \cdot 0,885 \cdot 0,276 \times \\ \times 0,802 \cdot 0,841 \cdot 0,985) \cdot 100\% = 16,1\%, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{п.в.}}$  – коэффициент дросселирования в подводящих паропроводах для приводной турбины, учитывающий гидравлические потери при течении пара в трубопроводах от отбора пара из энергетической турбины;  $\eta_{\text{с.р.к.}}$  – коэффициент дросселирования стопорно-регулирующих клапанов приводной турбины;  $\eta_{\text{т.у.}}$  – КПД турбоустановки, включающий в себя термический коэффициент полезного действия, внутренний относительный КПД проточной части приводной турбины, а также механический КПД питательного турбонасоса;  $\eta_{\text{п.н.}}$  – внутренний КПД питательного насоса;  $\eta_{\text{б.н.}}$  – внутренний КПД бустерного насоса;  $\eta_{\text{ред.}}$  – КПД редуктора.

Сравнивая значения, полученные при обработке эксплуатационных параметров с паспортными характеристиками, установлено, что паспортный КПД ПТН больше эксплуатационного на 0,05– 5,11%. Это может быть обусловлено износом оборудования в условиях длительной эксплуатации, а также работой энергоблока в нерасчетных режимах.

Для анализа полученных данных первоначально был использован метод множественной регрессии. При попытке моделирования работы насоса на основе выборки, состоящей из 5445 значений, коэффициент корреляции не превышал 0,49, коэффициент детерминации – 0,24. Разделение точек замера по источнику подачи пара на ПТН и создание на их основе регрессионных моделей позволило повысить коэффициент корреляции до 0,8, коэффициент детерминации до 0,55. Полученные модели при этом признаны работоспособными, однако обладают низкой точностью для решения поставленных в рамках диссертационной работы задач. Это доказывает предпочтительность применения в разработанной методике технологии нейросетевого моделирования в сравнении с регрессионным анализом.

Основной задачей при использовании нейросетевой технологии моделирования является подбор архитектуры нейросети, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к конкретной нейросетевой модели. Масштаб и структура сети должны соотноситься с исследуемым процессом с точки зрения достижимой точности и вычислительной сложности. Нет заранее определенного, строго алгоритма, позволяющего с достаточной степенью точности подсказать, какой архитектуры должна быть нейросеть при решении той или иной задачи. Так как сложность при определении архитектуры нейросети связана в том числе, с ко-

личеством выходных параметров, которыми в рамках данного исследования являются термодинамический КПД и удельный расход тепловой энергии брутто на работу ПТН, то целесообразно создание двух независимых между собой нейронных сетей.

Для каждой неросетевой модели создана трехслойная сеть с тринадцатью входными параметрами и одним выходным. Входными параметрами для нейросетевой модели являлись эксплуатационные данные, отражающие работу питательного турбонасоса со стороны систем питательной воды, паропроводов собственных нужд энергоблока и системы циркуляционного водоснабжения конденсаторов приводных турбин.

Далее результаты приведены применительно к ПТН №1. Остальные питательные турбонасосы проходили аналогичный процесс обработки данных и разработки моделей.

При построении моделей исследование проводилось при электрической мощности энергоблока от 95 до 107% от номинальной. Рассматриваемый энергоблок работает преимущественно в базовом режиме работы, следовательно, наибольшие потери тепловой энергии в абсолютной величине накапливаются при данной мощности.

После завершения процесса обучения нейросети модель анализируется на точность и соответствие физическим законам моделируемых явлений (рисунки 2 и 3); определяется ряд характеристик нейросетевых моделей (таблица 3).

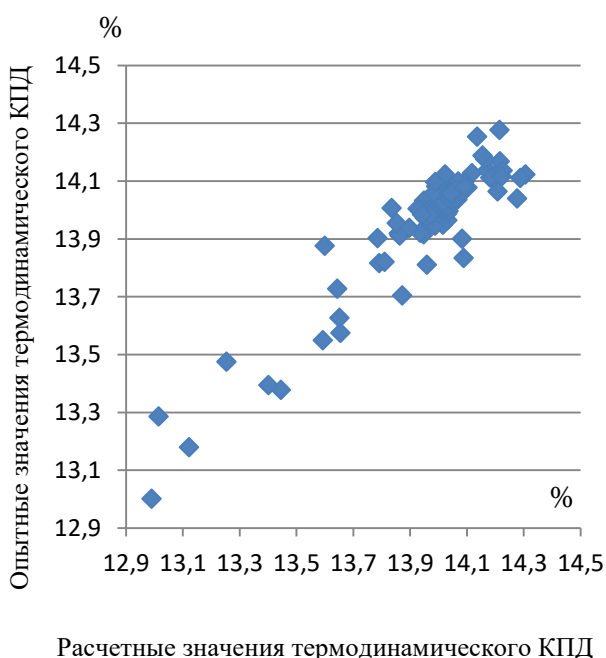


Рисунок 2—Корреляционная диаграмма зависимости опытного и расчетного термодинамического КПД ПТН

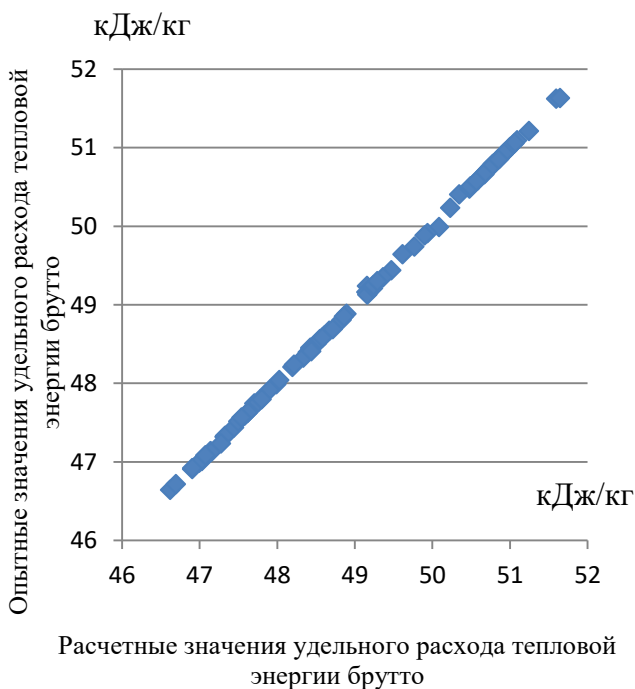


Рисунок 3—Корреляционная диаграмма зависимости опытного и расчетного расхода тепловой энергии брутто на приводную турбину ПТН

Таблица 3– Характеристики нейросетевых моделей ПТН №1

Наименование	Значения нейросетевой модели по определению КПД работы ПТН	Значения нейросетевой модели по определению удельного расхода тепловой энергии брутто на ПТН
Среднеквадратичное отклонение	0,006 %	$4,93 \times 10^{-5}$ кДж/кг
Средняя абсолютная ошибка	0,19 %	$3,1 \times 10^{-3}$ кДж/кг
Минимальная абсолютная ошибка	$7,15 \times 10^{-5}$ %	$1,26 \times 10^{-7}$ кДж/кг
Максимальная абсолютная ошибка	1,04 %	0,16 кДж/кг
Коэффициент корреляции	0,86	0,98
Погрешность модели %	$\pm 1,6$ %	$\pm 0,3$ %

По итогам верификации полученных нейросетевых моделей на основе выборки из 5% эксплуатационных данных, не участвовавших в процессе обучения, подтверждено соответствие качества моделирования задачам, поставленным в рамках данного исследования. Погрешность экспериментальных расчетов нейросетевыми моделями эффективности ПТН не превышала трех процентов в объеме верификационной выборки.

Для каждого питательного турбонасоса получено по две нейронные сети, предназначенные для моделирования различных режимов эксплуатации ПТН, с целью определения термодинамического КПД и удельного расхода тепловой энергии брутто на приводную турбину.

В **четвертой** главе приведены результаты работы с полученными нейросетевыми моделями с точки зрения практической значимости применения разработанной методики.

Для обеспечения возможности практического использования полученных моделей созданы специализированные программные комплексы, вычислительными компонентами которых являются нейросетевые модели ПТН. Данные программные комплексы позволяют по заданному набору исходных эксплуатационных параметров, полученных со штатных контрольно-измерительных приборов электростанции, определить КПД и удельный расход тепловой энергии брутто на приводную турбину ПТН в заданном эксплуатационном режиме.

Построенные нейросетевые модели позволяют определить степень влияния каждого параметра на критерии эффективности ПТН. Данная функция полезна при поиске оптимального набора значений эксплуатационных параметров, при котором питательный турбонасос работает с наибольшей эффективностью. На основе анализа опыта эксплуатации исследуемых ПТН выявлена возможность прямого либо косвенного воздействия на следующие параметры: расход пара на приводную турбину, расход питательной воды, пропускаемой через ПТН, температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора приводной турбины, температура пара на выхлопе приводной турбины, давление питательной воды на напоре насоса.

Воздействие на остальные параметры возможно лишь при грубом вмешательстве в работу другого оборудования энергоблока. Данный вопрос имеет бо-



лее высокий уровень трудоемкости и не рассматривается в рамках текущей работы, хоть и является перспективным.

Отобранные параметры являются варьируемыми в соответствии с разработанной методикой. На основе этих переменных строится и решается оптимизационная задача, где в качестве целевой функции рассматривается минимальное значение удельного расхода тепловой энергии брутто, отпускаемого на приводную турбину или максимальный КПД ПТН. Решение подобной задачи для каждого конкретного питательного турбонасоса в различных эксплуатационных условиях даст возможность определения технически обоснованного нормативного расхода тепловой энергии брутто на работу каждого ПТН. Под нормативным понимается допустимое технически обоснованное значение удельного расхода тепловой энергии брутто на приводную турбину ПТН в расчете на килограмм питательной воды.

Для демонстрации результатов применения разработанной методики приведен пример определения технически обоснованного нормативного удельного расхода тепловой энергии брутто на работу одного питательного турбонасоса в течение года эксплуатации. Для каждой точки эксплуатации определены режимы наиболее оптимальной работы оборудования, при которых наблюдался минимальный удельный расход тепловой энергии брутто.

В результате анализа полученной информации по работе ПТН определено:

- реальные затраты тепловой энергии составили 1 426 983 ГДж;
- теоретически возможные затраты тепловой энергии при условии работы в оптимальном режиме 1 306 369 ГДж;
- среднее снижение расхода пара на приводную турбину составит 1,18 кг/с;
- при отводе избытков пара от питательного турбонасоса в энергетическую турбину среднегодовое увеличение мощности энергетической турбины составит 0,633 МВт (5,9% номинальной мощности приводной турбины ПТН).

В таблице 4 приведены общие значения реального и нормативного удельного расхода тепловой энергии брутто на исследуемые ПТН.

Таблица 4 – Результаты снижения удельного расхода тепловой энергии брутто за счет внедрения нейросетевой технологии

Оборудование	Средний реальный удельный расход тепловой энергии брутто на перекачку 1 кг воды, кДж/кг	Нормативный удельный расход тепловой энергии брутто на перекачку 1 кг воды, кДж/кг (изменение по сравнению с реальным удельным расходом)
ПТН №1	50,46	46,23 (-8,4 %)
ПТН №2	47,7	44,18 (-7,4 %)
ПТН №3	54,68	51,92 (-5 %)
ПТН №4	45,27	43,01 (-5 %)

Данная работа имеет особую актуальность для энергоблоков, имеющих в своем составе несколько параллельно работающих турбонасосов. Разные ПТН работают с различной степенью эффективности. Разработанный метод позволяет для каждого отдельного питательного турбонасоса подобрать оптимальный

режим эксплуатации, что в целом позволит повысить эффективность работы всего энергоблока.

Кроме повышения эффективности питательных турбонасосов путем оптимизации режима, рассматривалось также применение конструктивных решений для достижения поставленных целей. Рассмотрена модернизация проточной части регулирующего клапана (РК) приводной турбины. Степень дросселирования давления водяного пара, подаваемого на приводную турбину, в некоторых режимах превышает 50%, что при прочих равных условиях приводит к уменьшению срабатываемого в приводной турбине теплоперепада с соответствующим увеличением расхода пара на ПТН для сохранения его текущей внутренней мощности. Для анализа потерь пара, возникающих при дросселировании в регулирующих клапанах, построена и рассчитана по эксплуатационным данным трехмерная модель в программном пакете ANSYS Fluent. Проведенный анализ показал возможность снижения потерь при дросселировании пара на 15% вследствие модернизации проточной части РК: создание проточек в седле клапана, добавление ребер и перфорации в тарелке клапана. При этом сохраняется критический режим течения пара в режиме полного открытия, вследствие чего зависимость расхода пара от положения клапана изменяется незначительно.

Данная оптимизация конструктивных параметров клапана позволит повысить мощность приводной турбины на 3,2% либо соответственно снизит расход пара на нее. При этом излишки пара, подаваемого на ПТН, будут перенаправлены в энергетическую турбину, что даст дополнительную выработку электроэнергии энергоблоком. Предложенная конструкция позволяет снизить обратные токи пара внутри клапана.

Разработанная методика анализа и повышения эффективности эксплуатации питательных турбонасосов на основе нейросетевого моделирования принята к рассмотрению на Костромской ГРЭС, внедрена в промышленную эксплуатацию на энергоблоках №1 и №2 Калининской АЭС, что подтверждается двумя актами внедрения.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований питательных насосов с турбинным приводом, по результатам которых разработаны и научно обоснованы технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности электростанций за счет режимных и конструктивных мероприятий.

2. Доказана при сопоставлении с регрессионным анализом и детерминированным моделированием целесообразность применения нейронных сетей для моделирования работы питательных насосов с турбинным приводом. Разработана основанная на нейросетевой технологии и реальных эксплуатационных данных методика оценки эффективности питательных насосов с турбинным приводом и средства её компьютерной реализации, позволяющие учесть техническое состояние каждого отдельного агрегата и характерные режимы его эксплуатации. Применение методики позволяет обоснованно определять индивидуальные способы повышения эффективности питательных насосов с турбинным приводом.

3. В рамках разработанного подхода предложен способ установления количественной зависимости показателей эффективности питательных насосов с турбинным приводом от эксплуатационных параметров, позволяющий повысить точность прогнозирования показателей работы турбонасосов в различных режимах. На этой базе разработан технически обоснованный способ определения нормативного удельного расхода тепловой энергии брутто на приводные турбины питательных турбонасосов конденсационного типа, основанный на применении нейросетевой модели и выборки измеряемых показателей за длительный период эксплуатации и не требующий проведения испытаний на действующем оборудовании.

4. Обоснован способ повышения эффективности питательных турбонасосов за счет конструктивного совершенствования проточной части регулирующего клапана приводной турбины, позволяющего снизить гидравлические потери в регулирующем клапане.

5. Исследованы технико-экономические результаты применения методики оценки эффективности питательных турбонасосов и способов ее повышения на примере четырех питательных турбонасосов действующей электростанции.

6. Определены перспективы развития разработанной методики для повышения эффективности работы питательных турбонасосов электростанций, в частности, использование разработанных программных средств для распределения нагрузки между параллельно работающими питательными турбонасосами.

7. Результаты работы внедрены в промышленную эксплуатацию на энергоблоках №1 и №2 Калининской АЭС, а также приняты к рассмотрению на Костромской ГРЭС, что подтверждается двумя актами внедрения.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России:**

1. Дунаев, В.А. К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / В.А. Дунаев, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 63–70.

2. Горбунов, В.А. Повышение точности определения параметров эффективности турбоустановок с применением нейронных сетей / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков**, О.Ю. Нагорная, А.А. Беляков // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 4. – С. 5–12.

3. Горбунов, В.А. Оптимизация затрат энергии турбопитательных насосов блока АЭС нейросетевыми методами моделирования / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков** // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. №3 (122). – С. 54 – 60.

4. Горбунов, В.А. Определение гидравлических потерь пара в регулирующем клапане турбины на основе трехмерной модели / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков**, И.В. Алексеев, М.Н. Мечтаева / Вестник ИГЭУ. – 2019. – №. 5. – С. 12–23.

### **Результаты интеллектуальной деятельности:**

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016613350 «Анализ эффективности работы турбопитательного насосного агрегата». Авторы: **Лоншаков Н.А.**, Дунаев В.А., Горбунов В.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 24 марта 2016 года.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017660074 «Детальный тепловой расчет паровой турбины». Авторы: Работаев В.Г., Шошин В.Г., **Лоншаков Н.А.** Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 14 сентября 2017 года.

### **Тезисы и полные тексты докладов конференций:**

7. **Лоншаков, Н.А.** Исследование возможности повышения эффективности влажнопаровых турбин АЭС на основе нейросетевой технологии / **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов, С.Г. Андрианов // IX Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия-2014»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2014. – С. 8-12.

8. Горбунов, В.А. Повышение эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Дунаев // Электроэнергетика глазами молодежи:

Труды VI Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи Иваново»: Т.2. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – 2. – С. 335–338.

9. Дунаев, В.А. Повышение эффективности работы второго контура АЭС с использованием нейросетевой технологии / В.А. Дунаев, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // Матер. X Междунар. молодеж. науч. конф. «Тинчуринские чтения». Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2015. – С. 153–154.

10. Горбунов, В.А. Повышение эффективности работы тепломеханического оборудования АЭС с использованием нейросетевых технологий / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Дунаев // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения)». Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 51–54.

11. Дунаев, В.А. Повышение эффективности работы оборудования АЭС с использованием нейросетевых технологий / В.А. Дунаев, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // X Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия–2015»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 10–11.

12. Дунаев, В.А. Анализ эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / В.А. Дунаев, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, г. Томск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 82.

13. **Лоншаков, Н.А.** К вопросу о повышении эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС / **Н.А. Лоншаков**, Е.Д. Морару, В.А. Дунаев, В.А. Горбунов // Тезисы докл. XXII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и аспирант. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т.3. – М.: МЭИ, 2016. – С. 24.

14. Коркодинов, П.В. Исследование зависимости КПД турбопитательного насоса от температуры окружающей среды на основе средств компьютерного моделирования / П.В. Коркодинов, Д.В. Чигирева, **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // XI Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия–2016»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2016. – С. 39–41.

15. **Лоншаков, Н.А.** Повышение эффективности эксплуатации турбопитательных насосов АЭС / **Н.А. Лоншаков**, В.А. Горбунов // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 125.

16. Горбунов, В.А. Решение задач эффективности эксплуатации турбоустановок с применением нейросетевого инструментария на примере турбопитательных насосов АЭС / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков** // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения)». Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2017. – С. 84–87.

17. Мальцев, Н.А. Исследование зависимости точности моделирования ПТН от количества численных экспериментов / Н.А. Мальцев, А.Н. Гришков, **Н.А. Лоншаков** // XII Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия–2017»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2017. – С. 22 – 23.

18. Горбунов, В.А. Определение потерь энергии рабочей среды в регулирующем клапане паровой турбины ОК-12А / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков**, С.А. Токарев, И.В. Алексеев // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 9. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – С. 40 – 43.

19. Алексеев, И.В. Анализ и оптимизация регулирующего клапана турбопитательного насоса АЭС / И.В. Алексеев, С.А. Токарев, **Н.А. Лоншаков** // XIII Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия–2018»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2018. – С.17.

20. Коркодинов, П.В. Прогнозирование значения вакуума в конденсаторах паровых турбин АЭС / П.В. Коркодинов, **Н.А. Лоншаков** // XIII Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирант. и молодых ученых «Энергия–2018»: Матер. конф. Т. 2 – Иваново: ИГЭУ, 2018. – С. 24.

21. Горбунов, В.А. Оценка эффективности работы турбопитательных насосов АЭС / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков** // Тезисы докладов XI междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика ядерной энергетики» – М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018. – С. 62–63.

22. Горбунов, В.А. Анализ эффективности работы турбопитательного насоса АЭС / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков** // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XX Бенардосовские чтения)». Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – С. 77–80.

23. Горбунов, В.А. Сравнение эффективности работы питательных насосов с турбо- и электроприводом / В.А. Горбунов, **Н.А. Лоншаков** // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XX Бенардосовские чтения)». Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – С. 80–83.

**Лоншаков Никита Андреевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ С ТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.03.2020 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 28

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ