



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

20 ноября 2025 № ИК-Д-1016
на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»

кандидат физико-математических наук
Юрий Владимирович Фомин

«20» ноября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

на диссертацию **Минеева Павла Алексеевича**

**«Повышение эффективности работы турбоустановок электрических
станций с использованием искусственных нейронных сетей»**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы»

Актуальность темы диссертационной работы.

В современных условиях развития энергетического комплекса особо актуальны задачи повышения эффективности работы турбоустановок электростанций. Это обусловлено, как необходимостью снижения производственных издержек, так и требованиями по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу.

Повышение энергетической эффективности действующих турбоустановок электрических станций возможно посредством оптимизации их режимов работы. Существующие методы оптимизации режимов работы

оборудования не в полной мере учитывают сложность современных турбоустановок и динамичность их работы в энергосистеме.

Развитие цифровых технологий и методов искусственного интеллекта позволяет решить часть проблем, возникающих при оптимизации. Применение нейросетевых технологий позволяет создавать более точные модели поведения турбоустановок, учитывать нелинейные зависимости между параметрами и оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям работы.

Актуальность исследования также определяется потребностью в создании интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных осуществлять анализ эффективности работы турбоустановок электрических станций в режиме реального времени с учетом множества ограничений и требований к надежности работы оборудования. Внедрение таких систем позволяет существенно повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов и конкурентоспособность электроэнергетических предприятий.

Структура, объем и основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 11 таблиц и 4 приложения.

Во введении автор обосновал актуальность темы исследования, сформулировал цель и задачи работы. Описаны методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведён всесторонний анализ современного состояния проблемы оптимизации работы турбоустановок. Рассмотрены существующие методы и технологии, обоснована необходимость разработки новых подходов на основе нейросетевого моделирования. Представлен детальный обзор искусственных нейронных сетей и их применения в теплоэнергетике. Сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Вторая глава посвящена методологии исследования. В ней описаны методики определения целевых функций, выбора входных параметров,

проведения экспериментальных исследований и обработки полученных данных. Представлена разработанная аналитическая модель турбоустановки.

Третья глава содержит описание процесса разработки нейросетевой модели турбоустановки. Приведён детальный анализ влияния различных параметров на целевые функции, описан процесс валидации модели, представлен разработанный программный комплекс, базирующийся на нейросетевых моделях определения удельных расходов пара, тепла и топлива и коэффициента полезного действия турбоустановки К-1000-60/3000.

В четвёртой главе представлены результаты оптимизации режима работы турбоустановки с использованием нейросетевых технологий. Проведена оценка возможностей системы регулирования, выполнен анализ влияния различных параметров, представлены результаты оптимизации и оценка эффективности разработанных алгоритмов.

В заключении обобщены основные результаты исследования, сформулированы выводы по представленным в первой главе задачам, показана значимость полученных результатов. Представлены рекомендации по использованию разработанных методик и определены направления дальнейших исследований.

В приложениях представлены дополнительные материалы, подтверждающие достоверность полученных результатов: таблицы расчётных данных, графики, акты внедрения, методические материалы.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

В работе использованы апробированные методики расчета тепловых процессов, современные подходы к построению нейросетевых моделей и методы оптимизации. Все теоретические разработки подтверждены экспериментальными исследованиями на действующем энергетическом оборудовании.

Достоверность результатов подтверждается: соответствием результатов моделирования реальным процессам в турбоустановке, подтвержденным в ходе валидации нейросетевых моделей на независимых наборах данных; итогами промышленного внедрения разработанных методик.

Научные положения, выносимые на защиту, прошли проверку и получили подтверждение в ходе: апробации на научно-технических конференциях и публикации в рецензируемых научных изданиях.

Результаты исследования представлены в 26 публикациях, включая статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и материалы конференций различного уровня, что подтверждает их научную значимость и достоверность.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана модель расчета показателей тепловой экономичности ТУ ЭС с использованием искусственных НС и методов кластерного и факторного анализа, отличающаяся высоким уровнем точности расчета, допускающей возможность применения алгоритмов решения задачи повышения эффективности работы ТУ в режиме реального времени при эксплуатации.

2. Определены группы параметров для систем, характеризующих ТУ, оказывающих влияние на режим работы ТУ и регулируемых в режиме реального времени при эксплуатации ТУ. Проведена оценка их значимости посредством предварительного анализа режима работы ТУ.

3. Разработан алгоритм решения задачи оптимизации работы ТУ на основе модели расчета показателей тепловой экономичности ТУ с использованием искусственных НС, позволяющий определять направление повышения эффективности работы оборудования.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в развитии методологии нейросетевого моделирования турбоустановок, что позволяет расширить теоретические представления о возможностях оптимизации их работы. Разработанные автором подходы к созданию комплексных нейросетевых моделей с учетом большого числа входных и выходных параметров и нелинейности процессов в турбоустановках вносят существенный вклад в развитие теории теплоэнергетических процессов. Предложенные методики анализа влияния различных факторов на

эффективность работы оборудования обогащают теоретическую базу современной теплоэнергетики.

Практическая значимость работы определяется возможностью непосредственного применения разработанных методик и алгоритмов в производственных условиях. Созданные нейросетевые модели могут быть использованы для оптимизации режимов работы существующего оборудования, что позволит повысить его энергетическую эффективность и снизить производственные издержки. Разработанный программный комплекс имеет широкие возможности для внедрения на действующих электростанциях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать в проектных организациях при разработке нового энергетического оборудования и модернизации существующих турбоустановок, а также на действующих электростанциях для оптимизации режимов работы оборудования и повышения энергетической эффективности производства электроэнергии. Разработанные методики оптимизации целесообразно применять в системах управления турбоустановками для снижения производственных издержек и повышения точности прогнозирования показателей работы оборудования.

Практическое применение результатов возможно в научно-исследовательской деятельности при проведении дальнейших исследований в области нейросетевого моделирования работы турбоустановок и создания интеллектуальных систем управления.

Разработанные методики применяются на Калининской АЭС, что подтверждается соответствующими документами. Результаты исследования также используются в научно-исследовательской работе и учебном процессе, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Публикация результатов

Материалы диссертации отражены в 26 опубликованных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных

ВАК Минобрнауки РФ, 1 статье, индексируемой в международной базе Scopus, 1 статье в других изданиях, 18 тезисах и полных текстах докладов конференций, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в части направлений исследований:

пункт 1 «Разработка ... алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы ... энергетических установок на органическом ... топлив(е)»;

пункт 2 «Математическое моделирование, численные ... исследования ... рабочих процессов, протекающих в энергетических ... установках на органическом ... топлив(е)»;

пункт 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих ... технологий и оборудования для производства электрической и тепло-вой энергии...».

Замечания и вопросы

1. Алгоритм создания нейросетевых моделей представлен в виде графика, рекомендуется произвести разработку алгоритма в виде блок-схемы.

2. Выборка данных, используемых для обучения нейросетевых моделей, представленных в диссертационной работе, ограничена одним годом эксплуатации. Достаточно ли такого набора данных для полноценной работы моделей в условиях промышленной эксплуатации турбоустановок?

3. В условиях промышленной эксплуатации ТЭС и АЭС допускается использование программ с использованием открытого программного кода. В каком виде внедрены и для каких целей используются разработанные алгоритмы и программные комплексы?

4. Недостаточно ясно определено, в каком режиме (номинальном или переменном) работы электрической станции производится оптимизация режима работы турбоустановки.

5. В качестве целевой функции при оптимизации режима работы турбоустановки выбран удельный расход тепла. Как производится контроль электрической нагрузки в условиях заданного диспетчерского графика?

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не являются определяющими при оценке диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Минеева Павла Алексеевича на тему «Повышение эффективности работы турбоустановок электрических станций с использованием искусственных нейронных сетей», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, направленные на повышение энергетической эффективности эксплуатации турбоустановок электрических станций и имеющие важное значение для развития энергетической отрасли. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, оба документа изложены логично и четко.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки). Результаты диссертационного исследования апробированы на научно-технических конференциях и опубликованы в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор, Минеев Павел Алексеевич, заслуживает присуждения

ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Диссертация Минеева П.А., автореферат и отзыв ведущей организации обсуждены и одобрены на заседании Высшей школы атомной и тепловой энергетики, протокол № 5 от 24.10.2025г.

Подписанты:

Директор Высшей школы
атомной и тепловой энергетики,
доцент, к.т.н.

Калютик
Александр Антонович

«13» ноября 2025 г.

Доцент Высшей школы
атомной и тепловой энергетики,
доцент, к.т.н.

Аникина
Ирина Дмитриевна

«13» ноября 2025 г.

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

Адрес организации: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, Политехническая ул., д. 29 литера Б

Телефон: +7 (812) 775-05-30

Адрес электронной почты: office@spbstu.ru

Официальный сайт: www.spbstu.ru

