

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента – доктора технических наук

Юрина Валерия Евгеньевича

на диссертационную работу Минеева Павла Алексеевича

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

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

### **1. Актуальность избранной темы**

Диссертационная работа Минеева Павла Алексеевича посвящена актуальной проблеме повышения энергетической эффективности работы турбоустановок электрических станций посредством применения методов искусственного интеллекта. Проблема повышения эффективности работы турбоустановок имеет высокую актуальность. Это обусловлено растущим энергопотреблением, стремлением к снижению вредных выбросов в окружающую среду и накоплением больших массивов данных о работе турбоустановок, требующих использования передовых средств в работе с ними с целью рационализации использования энергии. Применение нейросетевых технологий способствует повышению точности прогнозирования режимов работы турбоустановок при решении вопросов повышения их энергетической эффективности, что напрямую влияет на экономическую эффективность производства электроэнергии. Актуальность исследования также определяется стратегической важностью повышения энергоэффективности в контексте государственной политики энергосбережения.

### **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность результатов исследования обеспечена комплексным подходом к их получению и верификации. В работе использованы современные методы математического моделирования турбоустановок с применением нейронных сетей и балансовых расчётов, что позволило создать научно обоснованную теоретическую базу исследования. Экспериментальная проверка разработанных алгоритмов проведена на реальных данных промышленного эксперимента турбоустановки К-1000-60/3000, подтвердившего корректность теоретических положений и работоспособность предложенных решений. Метрологическая обоснованность обеспечена применением стандартизованных методов обработки экспериментальных данных с оценкой погрешностей измерений.

### **3. Достоверность и новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обоснована применением опытных данных действующей атомной станции, а также широко используемых в энергетике методик анализа термодинамической и технико-экономической эффективности энергетических установок. Также достоверность подтверждается опубликованными научными работами: основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, включая 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК, материалы конференций и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующих положениях:

1. Разработана инновационная модель расчета показателей тепловой экономичности турбоустановок электрических станций, основанная на применении искусственных нейронных сетей в сочетании с методами кластерного и факторного анализа. Отличительной особенностью данной модели является высокая точность расчетов, позволяющая использовать алгоритмы оптимизации в режиме реального времени при эксплуатации оборудования.

2. Впервые определены и классифицированы группы параметров систем турбоустановок, оказывающих существенное влияние на режим работы оборудования и поддающихся регулированию в реальном времени. Значимость этих параметров была установлена посредством комплексного предварительного анализа режимов работы турбоустановки.

3. Создан уникальный алгоритм решения задачи оптимизации работы турбоустановок, основанный на разработанной модели с использованием искусственных нейронных сетей. Данный алгоритм позволяет не только определять оптимальные режимы работы оборудования, но и указывать конкретные направления повышения его эффективности.

4. Предложен комплексный подход к оценке влияния различных эксплуатационных параметров на эффективность работы турбоустановки, включающий анализ уровней конденсата греющего пара, расхода греющего пара на промежуточный пароперегреватель и расхода циркуляционной воды в конденсатор.

Полученные результаты существенно расширяют существующие представления о возможностях оптимизации работы турбоустановок и открывают новые перспективы в области повышения энергетической эффективности электростанций.

#### **4. Значимость для науки и практики полученных автором диссертации результатов**

Практическая значимость результатов подтверждена внедрением разработанного программного комплекса и регистрацией двух программных продуктов для определения показателей эффективности и оптимизации работы турбоустановки. Экономическая эффективность доказана расчётами потенциального прироста выручки электрической станции при внедрении разработанных алгоритмов оптимизации. Результаты исследования прошли научно-техническую экспертизу через публикации в рецензируемых изданиях и представление на научных конференциях.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в существенном развитии методологии нейросетевого моделирования энергетических установок. В работе впервые доказано, что использование искусственных нейронных сетей в сочетании с методами кластерного и факторного анализа позволяет достичь высокого уровня точности при расчете показателей тепловой экономичности турбоустановок. Разработанная автором модель существенно расширяет теоретические представления о возможностях применения нейросетевых технологий в теплоэнергетике. Особую ценность представляет обоснованный в диссертации комплексный подход к оценке эффективности работы турбоустановок, включающий использование удельного расхода пара, тепла и условного топлива в качестве целевых функций. Исследовано влияние ключевых параметров систем регенерации, перегрева пара и конденсации на общую эффективность установки, что вносит существенный вклад в теорию оптимизации теплоэнергетических процессов.

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

Разработанные положения могут быть использованы для уточнения идеологии проектирования новых и модернизации уже работающих энергокомплексов АЭС, а также в учебном процессе аспирантами в исследовательских работах и студентами при дипломном проектировании. Техническое решение может быть применено на действующих и проектируемых атомных электростанциях в РФ и за рубежом.

#### **6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертация имеет четкую логическую структуру и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 157 страниц машинописного текста, содержит 50 рисунков и 11 таблиц.

Во введении автор раскрывает значимость выбранной темы исследования, формулирует цель и задачи, а также методологическую базу. Во введении также отражается научная новизна работы, практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена комплексному анализу современного состояния проблем в области повышения энергетической эффективности турбоустановок. Здесь проводится детальный обзор существующих методов повышения эффективности, рассматриваются подходы к рационализации режимов работы, анализируются перспективы применения искусственных нейронных сетей. Особое внимание уделяется анализу целевых функций и методов оптимизации работы турбоустановок.

Вторая глава содержит методологическую основу исследования. Соискатель представляет описание процесса определения целевых функций, необходимых для реализации нейросетевой и оптимационной моделей, и основные данные для разработки аналитической модели турбоустановки К-1000-60/3000, используемой в качестве объекта для апробации моделей. В главе также изложены методология проведения промышленного эксперимента, определены необходимые входные параметры и проведена оценка погрешности экспериментальных измерений.

Третья глава посвящена разработке нейросетевой модели турбоустановки. Здесь проводится анализ влияния множества потенциальных входных параметров на целевые функции, разрабатывается инновационный алгоритм создания нейросетевых моделей. Также рассматриваются методы кластерного и факторного анализа в рамках обработки данных промышленного эксперимента. Производится разработка программного модуля, включающего нейросетевые модели для турбоустановки К-1000-60/3000, и валидация нейросетевых моделей на данных, не участвовавших в обучении нейронных сетей.

Четвертая глава содержит решение задачи повышения эффективности работы турбоустановки. В данной главе проводится оценка возможностей системы регулирования, предварительный анализ режимов работы, исследование влияния различных групп параметров на функционирование турбоустановки. Соискатель разрабатывает оптимационный алгоритм и оценивает эффективность предложенных решений.

В заключении резюмируются полученные в ходе диссертационного исследования результаты, формулируются основные выводы и рекомендации.

В приложениях представлены: документы о внедрении результатов исследования, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, дополнительные справочные материалы.

## **7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом**

**Достоинства:**

- использование грамотного научно-технического языка, владение специализированными терминами, грамотно выстроенная последовательность изложения с отражением причинно-следственных связей;

- весомая глубина анализа степени разработанности направления исследования, подтверждаемая обширным перечнем ссылочных публикаций, как отечественных, так и зарубежных авторов;
- значительное количество рецензируемых публикаций.

Замечания:

1. Представляется целесообразным более детально раскрыть методику определения оптимального количества скрытых слоев и нейронов в разработанной нейросетевой модели, поскольку это может существенно повлиять на точность прогнозирования и обобщающую способность модели.

2. Было бы полезно дополнить исследование анализом влияния погрешностей входных данных на точность получаемых результатов оптимизации, что позволило бы оценить робастность предложенного подхода.

3. Рекомендуется более подробно рассмотреть вопрос адаптации разработанной модели к изменениям параметров турбоустановки в процессе длительной эксплуатации, включая методику обновления и переобучения модели.

4. Желательно представить более детальный анализ вычислительной сложности предложенного алгоритма оптимизации с оценкой его применимости для реализации в режиме реального времени на типовых промышленных контроллерах.

Вышеуказанные замечания не снижают теоретической и практической ценности проведенных диссертантом исследований, и, по существу, не затрагивают основных положений и результатов представленной диссертации.

## **8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Результаты диссертационного исследования свидетельствуют о глубоком понимании автором проблематики оптимизации работы турбоустановок и современных методов математического моделирования турбоустановок. Разработанная методология нейросетевого моделирования демонстрирует высокую эффективность и практическую применимость.

Диссертационная работа Минеева Павла Алексеевича на тему «Повышение эффективности работы турбоустановок электрических станций с использованием искусственных нейронных сетей» является законченной научно-квалификационной работой, включающей новые научно-обоснованные технические решения, обеспечивающие повышение энергетической эффективности работы турбоустановок электрических станций посредством применения разработанных автором алгоритмов оптимизации с использованием искусственных нейронных сетей.

Диссертационная работа Минеева Павла Алексеевича соответствует паспорту специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы и отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»,

утверженного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Минеев Павел Алексеевич полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

## **Официальный оппонент:**

Юрин Валерий Евгеньевич,  
ведущий научный сотрудник отдела  
энергетических проблем ФИЦ  
«Саратовский научный центр  
Российской академии наук»,  
доктор технических наук

Юрий

Валерий Евгеньевич  
«24» ноябрь 2025 г.

Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»

Адрес организации: 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

Телефоны: +7 (8452) 27-14-36, +7 (8452) 23-45-10

Адрес электронной почты: sncransar@san.ru

Официальный сайт: <https://снцран.рф/>

Подпись Юрина В.Е. заверяю

Ученый секретарь ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», кандидат биологических наук

Селиванова  
Ольга Геннадьевна

24 марта 2025 г.