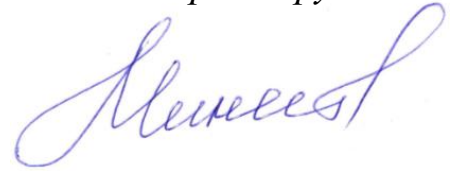


На правах рукописи



МИНЕЕВ Павел Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ТУРБОУСТАНОВОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Иваново 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

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

Киндра Владимир Олегович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры «Инновационные технологии наукоемких отраслей».

Ведущая организация:

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

Защита состоится «26» декабря 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфакская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

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

Текст диссертации размещен:

http://ispu.ru/sites/default/files/2025-10/Disser_Mineev_P.A..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___»_____2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01



Козлова
Мария Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Турбоустановки (ТУ) на электрических станциях (ЭС) относятся к основному оборудованию, обеспечивающему процесс производства электрической энергии. В связи с этим эффективность их работы оказывает значительное влияние на эффективность работы ЭС как системы в целом. Оценка и повышение энергетической эффективности работы оборудования ЭС необходимы в соответствии с государственными требованиями и с целью рационализации использования топлива на ЭС.

При этом большинство характеристик работы ТУ на ЭС записываются и накапливаются в виде больших массивов данных. На основе этих данных возможно проведение анализа режима работы ТУ ЭС: оценка энергетической эффективности эксплуатации оборудования и отклонений в функционировании систем.

На сегодняшний день, на ЭС большие данные обрабатываются в основном с использованием графического представления, а алгоритмы оптимизации могут отсутствовать, либо обладают низкой точностью вследствие использования упрощенных методик расчета целевых функций, либо требуют достаточно больших вычислительных мощностей, что делает невозможным их использование в режиме реального времени при эксплуатации – параллельно с работой систем записи характеристик работы ТУ. Искусственные нейросетевые (НС) технологии являются одним из эффективных способов обработки больших данных. Их апробация на ЭС показала рост энергетической эффективности при оптимизации таких систем, как вакуумная система и система регенерации ТУ. При этом скорость обработки данных с использованием НС моделей разрешает применение оптимизационных алгоритмов в режиме реального времени. Точность НС моделей при вычислении критериев эффективности также достаточно высока и приближена к точности приборов учета.

Вследствие представленной оценки, актуальной задачей является анализ возможности применения НС моделей в целях оценки эффективности работы ТУ и разработка оптимальных режимов работы ТУ с использованием НС моделей.

Степень разработанности темы диссертации.

Вопросами повышения энергетической эффективности различных систем ТУ ЭС более 150 лет назад стали активно заниматься, как в России, так и за рубежом. Существенный вклад внесли такие ученые, как Костюк А.Г., Трухний А.Д., Ольховский Г.Г., Юрин В.Е., Валамин А.Е., Киндра В.О., Хоменок Л.А., Калбалиев Р.Ф., Голдин А.С. и многие другие ученые.

Задачи моделирования ТУ ЭС, в том числе с использованием современного программного обеспечения, с целью исследования их эффективности продолжают решать в научных школах Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, Казанского государственного энергетического университета, НИУ МЭИ, Саратовского научного центра РАН, Нижегородского государственного технического университета имени Р.А. Алексеева, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и ряда других вузов и научных организаций.

До настоящего времени задачами оптимизации режима работы находящихся в эксплуатации ТУ ЭС занимались только с точки зрения традиционных оптимизационных алгоритмов. Основу для их применения заложили такие ученые СССР, как Веников В.А., Кржижановский Г.М. и Горштейн В.М. При этом существуют новые способы оптимизации действующих ТУ ЭС – методы машинного обучения, а именно НС моделирование. На сегодняшний день НС модели показали прирост эффективности вспомогательных систем ЭС в отдельности, в связи с тем, что они позволяют обрабатывать данные промышленного эксперимента с большей точностью. Однако вопросы, связанные с ростом эффективности основного оборудования, а именно ТУ ЭС в целом, малоизучены – требуется проведение исследований в данном направлении.

Цель диссертационной работы заключается в повышении энергетической эффективности эксплуатации действующих ТУ ЭС за счет оптимизации их режима работы с использованием искусственных НС.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Анализ и подбор целевых функций для оптимизации режима работы ТУ ЭС, находящихся в эксплуатации.
2. Разработка аналитической модели ТУ, позволяющей производить расчет основных расходов пара и воды и целевых функций, для целей обучения НС моделей.
3. Разработка алгоритма, необходимого для создания НС моделей ТУ ЭС, с использованием методов кластерного и факторного анализа. Апробация и программная реализация алгоритма разработки НС моделей с использованием данных промышленного эксперимента, проведенного на ТУ К-1000-60/3000.
4. Разработка алгоритма повышения эффективности ТУ с использованием НС моделей ТУ. Апробация и программная реализация алгоритма повышения эффективности с использованием данных промышленного эксперимента, проведенного на ТУ К-1000-60/3000.
5. Оценка эффективности использования разработанных алгоритмов на примере ТУ К-1000-60/3000.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности **2.4.5 «Энергетические системы и комплексы»** в части направлений исследований: по пункту 1 «Разработка ... алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы ... энергетических установок на органическом ... топлив(е)»; по пункту 2 «Математическое моделирование, численные ... исследования ... рабочих процессов, протекающих в энергетических ... установках на органическом ... топлив(е)»; по пункту 3 «Разработка, исследование, совершенствование действующих ... технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии...».

Научная новизна работы состоит 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 алго-

ритмов 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.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. **Доказана** целесообразность использования удельного расхода пара (УРП), удельного расхода тепла (УРТ), удельного расхода условного топлива (УРУТ) в качестве основных показателей (целевых функций), отражающих энергетическую эффективность работы ТУ ЭС, при разработке НС моделей. **Исследовано** влияние уровней конденсата греющего пара в подогревателях системы регенерации ТУ, расхода греющего пара на промежуточный пароперегреватель ТУ, расхода циркуляционной (охлаждающей) воды в конденсатор ТУ на УРТ. **Изложены** результаты обработки и анализа данных промышленных экспериментальных исследований ТУ, результаты разработки НС модели и алгоритма решения задачи повышения эффективности ТУ. **Обоснована** целесообразность применения НС технологий к моделированию ТУ, обеспечивающего постановку и решение задачи повышения эффективности оборудования.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный программный комплекс, позволяющий производить расчет значений целевых функций, параметров и расходов пара и воды, основанный на искусственных НС и теоретических моделях, защищенный свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ («Программа для определения показателей эффективности паротурбинной установки К-1000-60/3000», св-во о гос. регистрации № 2025665520).

2. Разработанные и реализованные в виде программного комплекса математические модели повышения эффективности ТУ: поиска оптимальных значений целевых функций при изменении значений варьируемых параметров в допустимых пределах. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ («Программа для оптимизации паротурбинной установки К-1000-60/3000», св-во о гос. регистрации № 2025665520).

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы методология и методы НС моделирования, балансовых расчетов технологических схем энергоустановок, оптимизации, обработки и анализа экспериментальных данных, расчета процессов теплообмена и технико-экономических показателей ТУ ЭС.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования ТУ, согласованностью результатов работы с данными, опубликованными в рабо-

тах других авторов для предельных случаев, применением установленных в нормативных документах методов обработки результатов экспериментального исследования, совпадением данных численного моделирования с использованием НС технологий и результатов экспериментального исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм разработки НС моделей ТУ.
2. НС модель ТУ на примере К-1000-60/3000.
3. Алгоритм решения задачи повышения эффективности ТУ, разработанный с использованием НС моделей, на примере К-1000-60/3000.
4. Результирующие параметры работы ТУ К-1000-60/3000, полученные в ходе практического использования разработанных программных модулей оптимизации ТУ.

Реализация результатов работы. Программный комплекс «Оптимизация работы ТУ К-1000-60/300» принят к рассмотрению в Филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская атомная станция», а также внедрен в учебный процесс на кафедрах «Тепловые электрические станции», «Атомные электрические станции» ИГЭУ при подготовке обучающихся по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» (13.03.01 и 13.04.01) и специалистов по направлению «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» (14.05.02).

Личный вклад автора заключается в анализе и поиске оптимальных параметров, используемых в качестве целевых функций для оптимизации работы ТУ; в разработке аналитической модели ТУ К-1000-60/3000, алгоритма создания НС моделей ТУ, НС моделей по поиску целевых функций и значений расходов пара, алгоритмов решения задачи повышения эффективности ТУ, программного комплекса «Оптимизация работы турбоустановки»; в сборе, обработке и анализе экспериментальных данных; в подготовке публикаций по тематике диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы и обсуждались на 9 конференциях, в том числе: VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и техно-логий» (г. Балаково, 2022); XXII и XXIII Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (г. Иваново, 2023, 2025); XVII, XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (г. Иваново, 2022, 2023, 2024); XIII Семинаре вузов по теплофизике и энергетике (г. Нижний Новгород, 2023); XXX, XXXI Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2024, 2025).

Публикации. 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.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 174 наименований. Текст диссертации изложен на 157 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 11 таблиц и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ современных методов повышения энергетической эффективности ТУ ЭС с классификацией по типу оборудования, входящего в ТУ, и по подходам к оптимизации режимов работы ТУ. Рассмотрены вопросы повышения эффективности ТУ путем оптимизации режима работы, как с использованием традиционных методов, направленных на определение оптимального распределения электрической и тепловой нагрузки между агрегатами энергосистемы и определение оптимальных значений целевых функций в ходе пусконаладочных испытаний оборудования, так и перспективных – преимущественно с использованием НС технологий и моделей, обзор базовых принципов разработки которых также представлен в первой главе. По результатам анализа установлено, что совмещение классических оптимизационных методик с современными технологиями искусственного интеллекта обеспечивает комплексный подход к повышению энергетической эффективности ТУ, что соответствует стратегическим задачам отечественной энергетики. С учетом результатов обзора обосновано направление диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе осуществляется поиск критериев (целевых функций), определяющих изменение эффективности ТУ ЭС. Рассматриваются такие показатели, как:

1) Коэффициент использования установленной мощности:

$$\text{КИУМ} = \frac{\frac{\mathcal{E}_{\text{год}}}{\text{мес}}}{N_{\text{уст}} \tau_{\text{год}}^{\text{мес}}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{год/мес}}$ – выработка электроэнергии станцией/блоком за год или месяц, МВт·ч; $N_{\text{уст}}$ – заявленная установленная электрическая мощность станции/блока, МВт; $\tau_{\text{год/мес}}$ – время работы станции/блока в определенном периоде (год/месяц), ч.

2) Удельный расход выгоревшего ядерного топлива (для АЭС):

$$b_{\text{я.т.}}^{\text{бр}} = \frac{1}{Q_{\text{я.т.}} \eta_{\text{АЭС}}} \quad (2)$$

где $Q_{\text{я.т.}}$ – количество теплоты, выделяемое ядерным топливом, кДж/кг; $\eta_{\text{АЭС}}$ – КПД АЭС.

3) Полный удельный расход условного топлива (для АЭС):

$$b_{\text{э}}^{\text{полн}} = \frac{a \cdot B_{\text{ят}} \cdot 24 \cdot 3600}{\mathcal{E}_{\text{отп}} \cdot \mu \cdot n \cdot Q_{\text{н.у.}}^{\text{р}}}, \quad (3)$$

где a – средняя глубина выгорания ядерного горючего, МВт (т) сутки/т У; $B_{\text{ят}}$ – топливная загрузка, тУ; $\mathcal{E}_{\text{отп}}$ – количество электрической энергии, отпущенной АЭС, МВт·ч. μ – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ); n – кампания топлива в активной зоне реактора, год; $Q_{\text{н.у.}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания условного топлива (29,3 МДж/кг).

4) Абсолютный электрический КПД брутто:

$$\eta^{abc}_{э} = \eta_t \eta_{oi} \eta_{эм} \eta_{тр} \eta_{ка/(пг+р)}, \quad (4)$$

где η_t – термический КПД, η_{oi} – внутренний относительный КПД, $\eta_{эм}$ – электромеханический КПД, $\eta_{тр}$ – КПД транспорта, $\eta_{ка/(пг+р)}$ – КПД котлоагрегата для ТЭС или КПД парогенератора и реактора для АЭС.

При этом работа НС модели ТУ предполагает соответствие показателей следующим критериям: 1) измерение или расчет в режиме реального времени (параллельно с фиксацией значений измеряемых параметров системами электростанции), 2) полное отражение эффективности работы ТУ. Установлено, что этим критериям соответствуют следующие показатели:

5) Удельный расход пара:

$$d_э = D_0/N_э, \quad (5)$$

где D_0 – расход пара на ТУ, кг/с; $N_э$ – электрическая мощность, кВт.

6) Удельный расход тепла:

$$q_э = Q_t/N_э, \quad (6)$$

где Q_t – расход тепла на турбоустановку, кДж.

7) Удельный расход условного топлива:

$$b_э = \frac{122,8}{\eta_{abc}^э}. \quad (7)$$

Примечание – несмотря на то, что УРУТ не является конвенциональным показателем эффективности работы АЭС, целесообразность его использования обусловлена возможностью сравнения эффективности разных типов электростанций между собой и экстраполяции результатов различных научных исследований.

На основе анализа технической литературы в качестве ключевой целевой функции при проведении оптимизации режима работы действующих ТУ определен УРТ.

В качестве объекта исследования выбрана ТУ АЭС в связи с тем, что такой вид ТУ представляет наибольший интерес для цели научных исследований по причине наличия дополнительного оборудования (в частности, сепаратора-пароперегревателя или СПП), а также более сложными процессами, связанными с повышенной влажностью рабочей среды (пара) в сравнении с ТУ КЭС.

В ходе исследования установлен минимальный набор измеряемых параметров, а также проведен эксперимент на 4 энергоблоке Калининской АЭС, где в качестве ТУ используется паровая турбина К-1000-60/3000, с записью этих параметров для дальнейшей обработки. При обработке результатов промышленного эксперимента и анализе документации электростанции о проведении проверок приборов учета выполнена оценка погрешности измерений.

Разработана аналитическая модель на примере ТУ К-1000-60/3000. Необходимость ее представления обусловлена требованиями расчета значений целевых функций. Аналитическая модель представляет собой балансовую модель, функционирующую на основе уравнений тепловых и материальных балансов.

При разработке аналитической модели определены влияющие на расходы пара измеряемые показатели приборов учета (Рисунок 1), необходимые для создания НС моделей для каждого расхода и использования их при оптимизации режима работы ТУ.

Проведено сопоставление расчетов значений целевых функций средствами итерационной аналитической модели и с использованием упрощенных методик расчета, используемых на ТУ на сегодняшний день. Данные, представленные в существующих АСУ ЭС, оказываются менее точными в сравнении с данными аналитической модели, так как существующие АСУ ЭС используют упрощенные формулы расчета показателей. Показания удельных расходов оказываются заниженными в среднем на 1,3%.

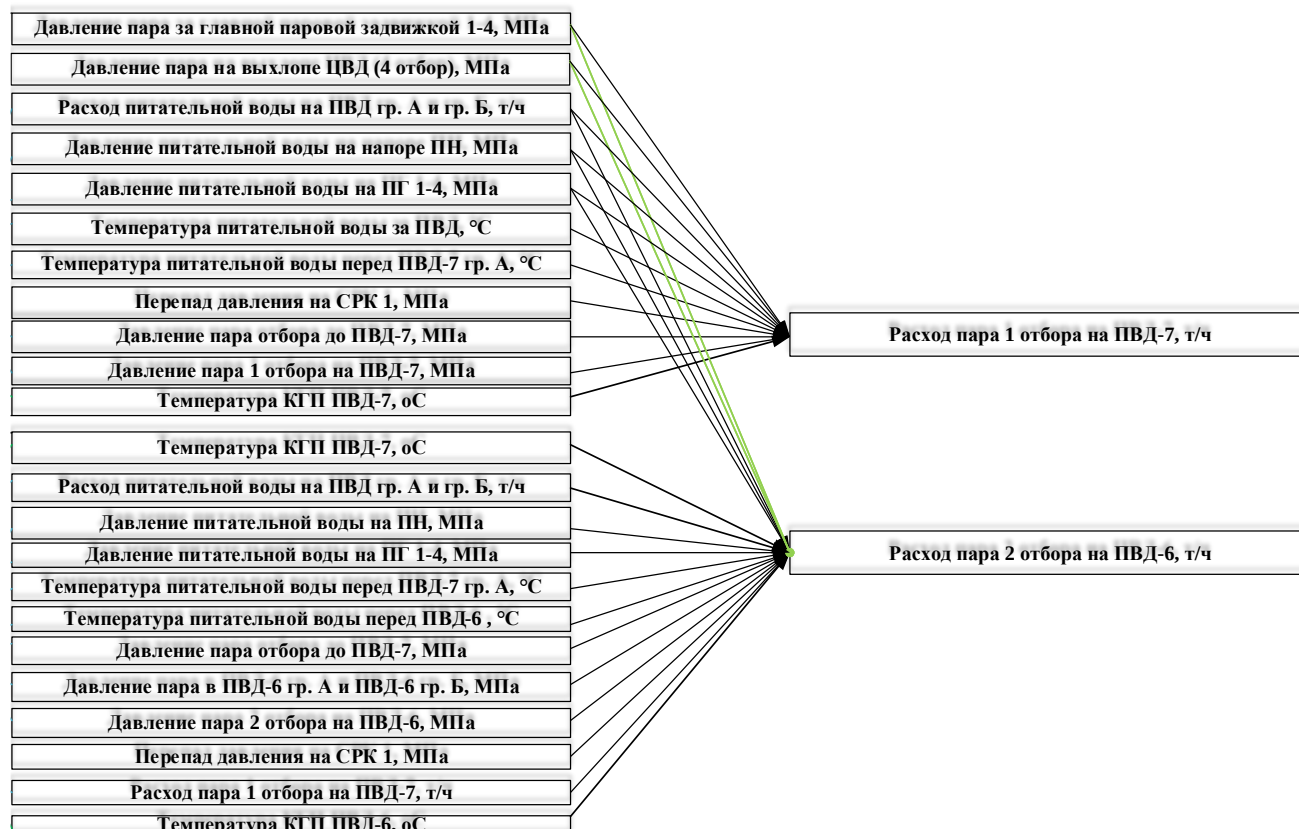


Рисунок 1. Показатели приборов учета, влияющие на расходы пара 1-2 отборов ТУ

В третьей главе выполнена оценка значимости целевых функций и анализ влияющих на них параметров. Факторный анализ проведен по 12 факторам (фактор – абстрактный критерий, относительно которого производится оценка связи между параметрами), в таблице 1 представлены значения коэффициентов корреляции, превышающие значение 0,7, выявленные по факторам 1 и 6.

Таблица 1. Выходные данные факторного анализа

Параметр	Фактор 1	Фактор 6	Параметр	Фактор 1	Фактор 6
Расход пара в конденсаторе	-0,92	-0,15	Давление 4 отб.	-0,87	0,06
Расход пара на ПВД-6	-0,92	-0,02	Темп. 4 отб.	-0,91	0,01
Расход пара на ПНД-3	0,74	0,14	Давление ПНД-4	-0,87	0,05
Расход пара на ПНД-2	0,85	0,01	Давление 5 отб.	-0,71	0,14
Расход пара на ПНД-1	0,77	0,10	Давление ПНД-3	-0,76	-0,03
Расход на выходе ЦВД	-0,74	-0,22	Давление 6 отб.	-0,75	0,02
Расход пара на ТПН	-0,71	-0,11	Давление 8 отб.	-0,76	0,16

Продолжение таблицы 1

Параметр	Фактор 1	Фактор 6	Параметр	Фактор 1	Фактор 6
Расход основного конденсата через БОУ	-0,77	-0,06	Давление ПНД-1	-0,71	0,28
Расход основного конденсата за ПНД-1	-0,87	-0,06	Расход питательной воды на ПГ	-0,72	-0,11
Темп. ЦВ на входе в конденсатор	-0,88	0,08	Давление НСС-1	-0,11	0,78
Темп. ЦВ на выходе конденсатор	-0,89	0,07	Давление НСС-1	0,11	-0,78
Темп. пара вых. ЦНД	-0,88	0,02	Темп. ПНД-1	-0,96	0,04
Давление в конденсаторе	-0,85	0,08	Темп. основного конденсата перед ПНД-3	-0,78	-0,05

В ходе кластерного (рисунок 2) и факторного анализа (таблица 1) также установлено, что все предварительно отобранные 78 показателей оказывают значительное влияние на УРП, УРТ и УРУТ.

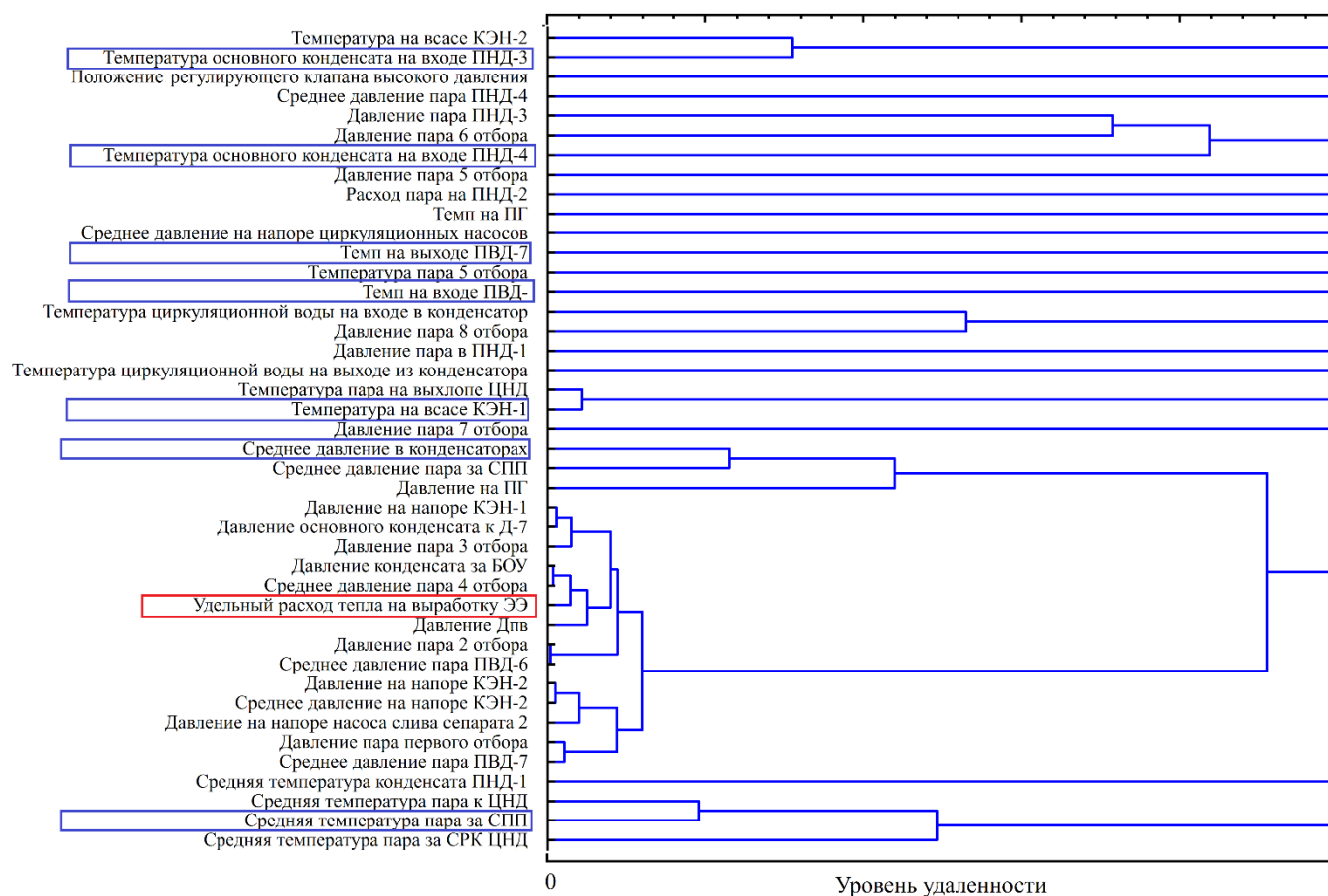


Рисунок 2. Фрагмент диаграммы кластерного анализа

Определен алгоритм обучения, обеспечивающий максимальную точность НС модели. На малой выборке промышленного эксперимента (1000 значений) произведен анализ различных структур НС. Среди рассмотренных алгоритмов наиболее точным является алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдбафа-Шенно или BFGS (таблица 2), который характеризуется величиной ошибки при валидации 0,88%.

Таблица 2. Сравнение НС моделей (выборка из 1000 значений)

№ п/п	Точность %	Точность при валидации %	Ошибка %	Ошибка при валидации %	Тип	Алгоритм	Функция активации
1	99,98	99,95	0,933	0,883	MLP	BFGS	Тангенциальная
2	99,97	99,85	1,369	8,365	MLP	BFGS	Логистическая
3	99,99	99,54	0,319	8,409	MLP	BFGS	Экспоненциальная
4	99,84	99,80	8,966	7,908	MLP	Gradient descent	Тангенциальная
5	99,83	99,75	7,648	8,530	MLP	Conjugate gradient	Тангенциальная

Примечание: MLP (multilayer perceptron) – многослойный персептрон, Gradient descent – алгоритм градиентного спуска, Conjugate gradient – алгоритм сопряженных градиентов

Создание и обучение НС модели проводилось согласно разработанному алгоритму, представленному на рисунке 3 с использованием программного комплекса Statistica. Точность результирующей НС модели была определена посредством валидации на данных, не участвовавших в обучении (около 10% массива исходных данных), и во всех случаях превышает 99%.

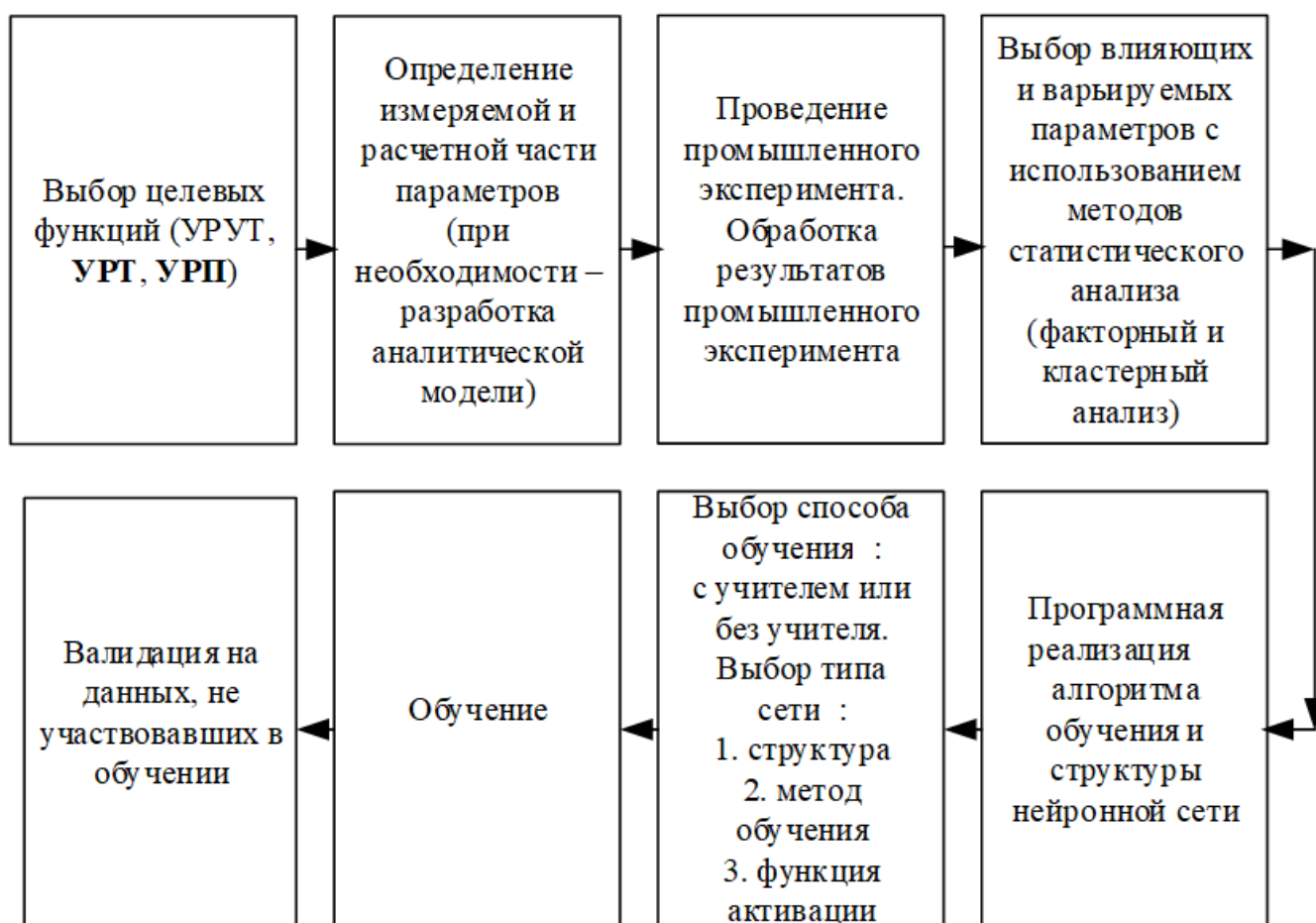


Рисунок 3. Обобщенный алгоритм разработки НС модели

Диалоговое окно программного комплекса с НС моделями представлено на рисунке 4

Нейросетевая модель паротурбинной установки К-1000-60/3000

Подгрузить

Номер эксперимента

Положение СРК	71.1	%	Расход сепарата СПП	317.4	т/ч
Температура пара на входе ЦВД	273	°C	Расход на выходе ЦВД	4329.8	т/ч
Температура ЦВ на выходе из К	21.39	°C	Расход пара на ТПН	116.5	т/ч
Давление в К	4.49	кПа	Влажность на выходе ЦВД	0.151	б/р
Давление пара ПП	5.61	МПа	Внутренняя мощность ЦВД	487.7	МВт
Расход пара на ПП	693.5	т/ч	Внутренняя мощность ЦНД	588.8	МВт
Положение РУ 2 ПНД-2	32.4	%	Расход через БОУ	3240	т/ч
Давление НСС-1	1.74	МПа	Температура ЦВ на входе в К	12.45	°C
Давление НСС-2	0.43	МПа	Температура пара на выходе ЦНД	30.86	°C
Давление ОК КЭН-2	1.84	МПа	Давление на напоре ЦН	194.525	кПа
Расход пара на ЦВД	5457.3	т/ч	Давление на напоре КЭН-1	1.012	МПа
Расход пара на ЦНД	3895.8	т/ч	Температура на всасе КЭН-1	27.93	°C
Расход пара в конденсатор	3183.9	т/ч	Расход ОК за БОУ	3130	т/ч
Расход пара на ПВД-7	351.3	т/ч	Давление ОК за БОУ	0.551	МПа
Расход пара на ПВД-6	322.6	т/ч	Температура на всасе КЭН-2	84.2	°C
Расход пара на Д-7	182.1	т/ч	Давление на напоре КЭН-2	1.885	°C
Расход пара на ПНД-5	271.6	т/ч	Расход ОК от ПНД-5 к Д-7	4171	т/ч
Расход пара на ПНД-4	159.8	т/ч	Температура пара за СПП	256.93	°C
Расход пара на ПНД-3	148.8	т/ч	Температура пара перед СРК ЦНД	256.175	°C
Расход пара на ПНД-2	229.2	т/ч	Температура пара за СРК ЦНД	255	°C
Расход пара на ПНД-1	174.1	т/ч	Расход на напоре НСС	589	т/ч
			Давление 1 отбора	2.19	МПа

Перейти к модулю автоматизации

5.35

Электрическая мощность

1067

МВт

Температура ОК за ПНД-3	99.6	°C
Температура ОК перед ПНД-4	100.2	°C
Температура ОК перед ПНД-5	120.8	°C
Температура ОК перед Д-7	155.2	°C
Температура ПВ перед ПВД-6	166	°C
Температура ПВ за ПВД-6	190.9	°C
Температура за ПВД-7	215.05	°C
Температура на ПГ	221.8	°C
Давление ПВ на ПГ	7.0375	МПа
Температура в коллекторе упл	157.1	°C
Частота ЦН-1	278	об/мин
Частота ЦН-2	279	об/мин
Частота ЦН-3	278	об/мин
Частота ЦН-4	278	об/мин

Запустить работу нейронной сети

Нейросеть	Расчет	кг
УРП на ЭЭ	5.76	5.7606
УРТ на ЭЭ	10693.2	10694.9
КПД эл	33.67	33.66
УРУТ на ЭЭ	0.365	0.365

Отобразить результаты теплового расчета на схеме

В четвертой главе на основе исследования возможностей системы управления ТУ определены группы параметров для систем, входящих в ТУ, оказывающих влияние на режим работы ТУ и регулируемых в режиме реального времени при эксплуатации ТУ.

$$\begin{cases} \text{YPT} = f(G_i, t_{\text{пв}}); \\ G_i = f(H_{\text{пвд-7}}, H_{\text{пвд-6}}, H_{\text{пнд-5}}, H_{\text{пнд-4}}, H_{\text{пнд-3}}, H_{\text{пнд-2}}, H_{\text{пнд-1}}); \\ t_{\text{пв}} = f(H_{\text{пвд-7}}, H_{\text{пвд-6}}, H_{\text{пнд-5}}, H_{\text{пнд-4}}, H_{\text{пнд-3}}, H_{\text{пнд-2}}, H_{\text{пнд-1}}), \end{cases} \quad (8)$$

$t_{\text{пв}}$ – температура питательной воды на входе в парогенератор, °C;

В следующую группу расход греющего пара на промежуточный пароперегреватель СПП ТУ и зависящие от него параметры:

где $t_{\text{пе}}$ – температура пара на выходе из пароперегревателя, °С;

Также в системе управления существует возможность регулирования расхода циркуляционной (охлаждающей) воды в конденсатор ТУ:

$$\begin{cases} YPT = f(G_{цв}, p_k); \\ G_{цв} = f(N_{цн}); \\ p_k = f(G_{цв}, G_k, t_{цви}); \\ G_k = f(p_k), \end{cases} \quad (10)$$

где $G_{цв}$ – расход циркуляционной воды, кг/с; $N_{цн}$ – расход электрической энергии на приводы циркуляционных электронасосов, кВт; p_k – вакуум в конденсаторе, кПа; G_k – расход пара в конденсатор, кг/с; $t_{цви}$ – температуры циркуляционной воды на входе и выходе из конденсатора, °C.

В результате предварительного анализа режима работы ТУ в среднем снижение значения целевой функции (УРТ) при изменении уровней конденсата греющего пара в подогревателях системы регенерации турбоустановки составило 45,44 кДж/(кВт·ч) или 0,41%, расхода греющего пара – 21,89 кДж/(кВт·ч) или 0,20%, расхода циркуляционной воды – 41,25 кДж/(кВт·ч) или 0,38%. При этом электрическая мощности увеличилась в среднем на 1,91 МВт.

На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма оптимизации. В качестве исходных данных используются характеристики работы ТУ аналогичные,

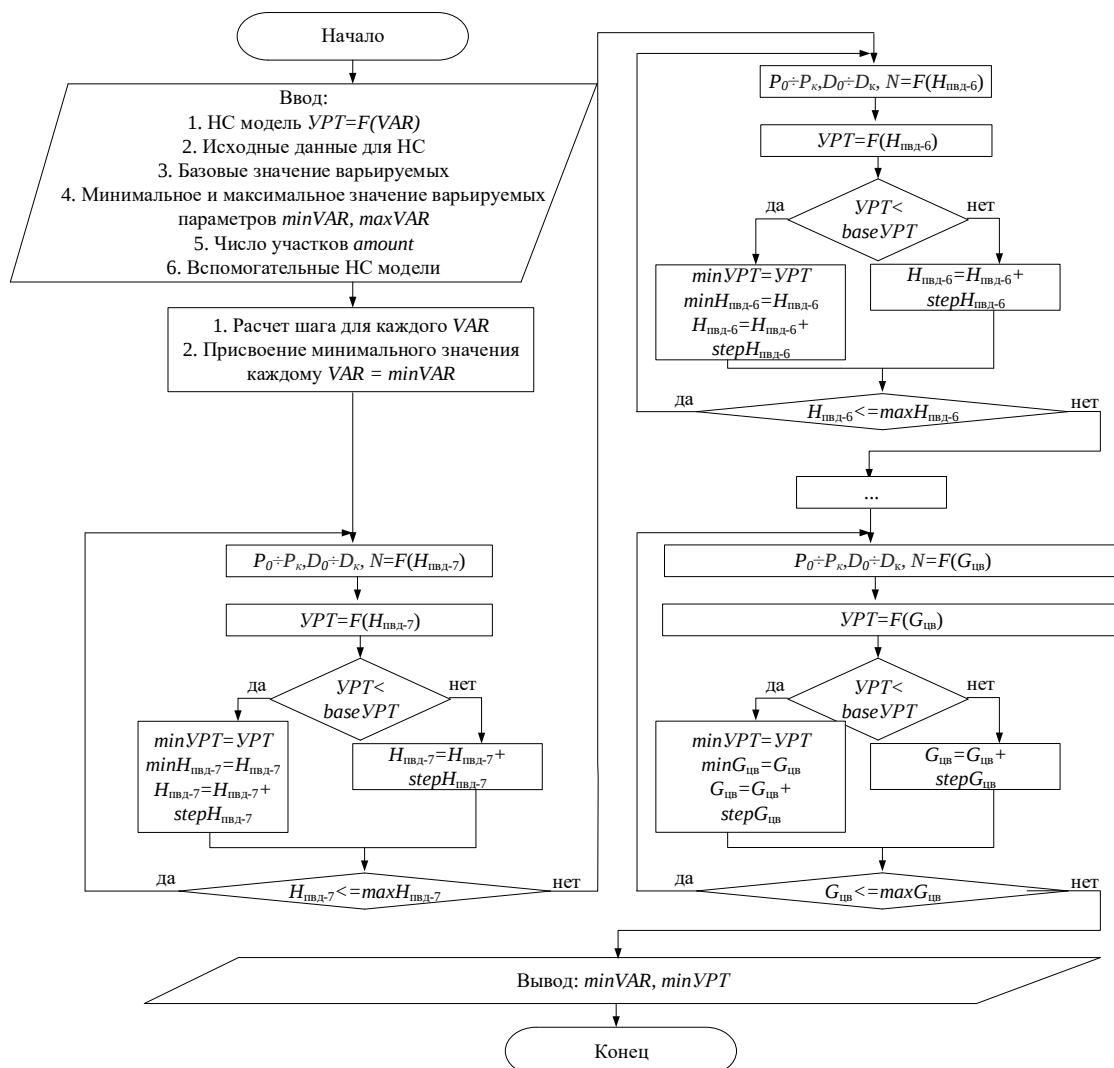


Рисунок 5. Обобщенная блок-схема алгоритма оптимизации ТУ ЭС

как и при предварительном анализе (78 параметров). В алгоритме на каждом шаге для каждой группы варьируемых параметров происходит перебор остальных варьируемых параметров с заданным шагом с фиксацией экстремума (минимального значения для условий решаемой задачи) УРТ. По завершении работы алгоритма в систему записываются рассчитанные значения УРТ и варьируемых параметров, соответствующие минимальному значению рассматриваемой целевой функции.

Разработана надстройка для программного комплекса (диалоговое окно надстройки представлено на рисунке 6), которая подразумевает собой следование оптимизационному алгоритму. В процессе разработки надстройки была выполнена разработка множества НС моделей для определения значений электрической мощности, а также параметров, зависящих от варьируемых характеристик.

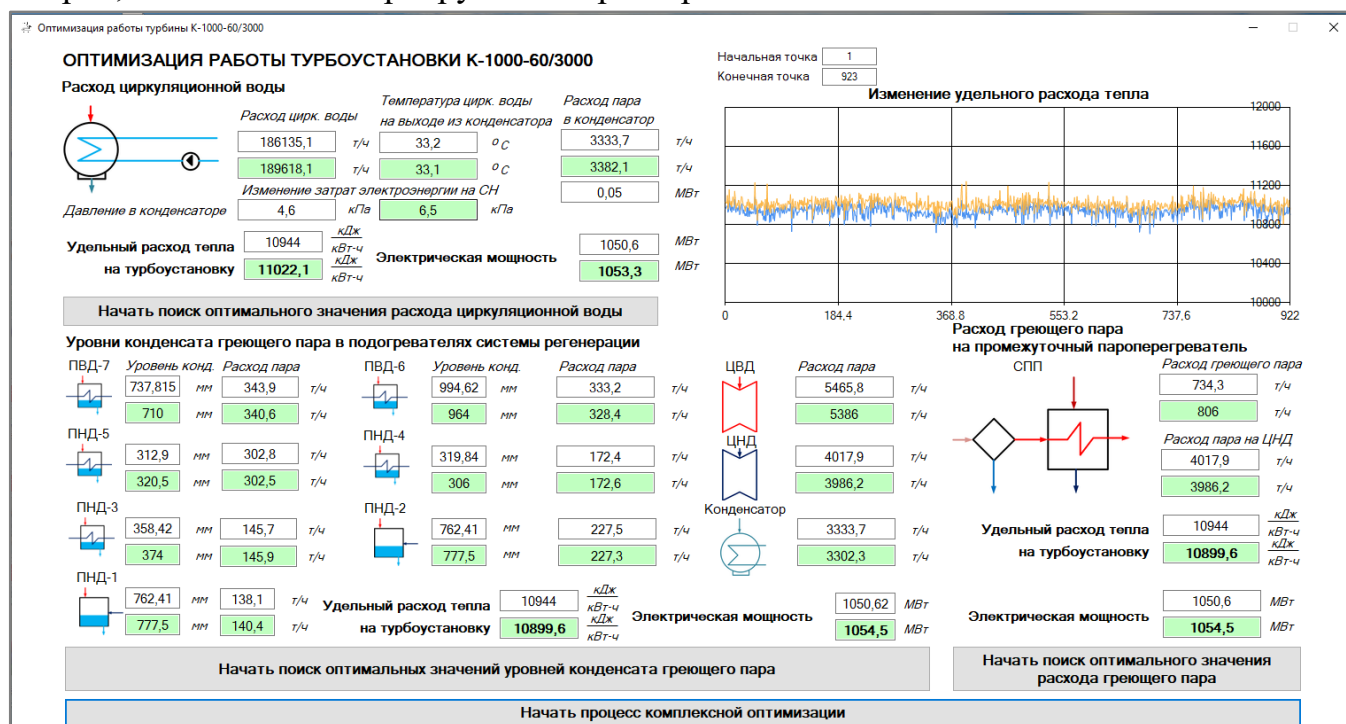
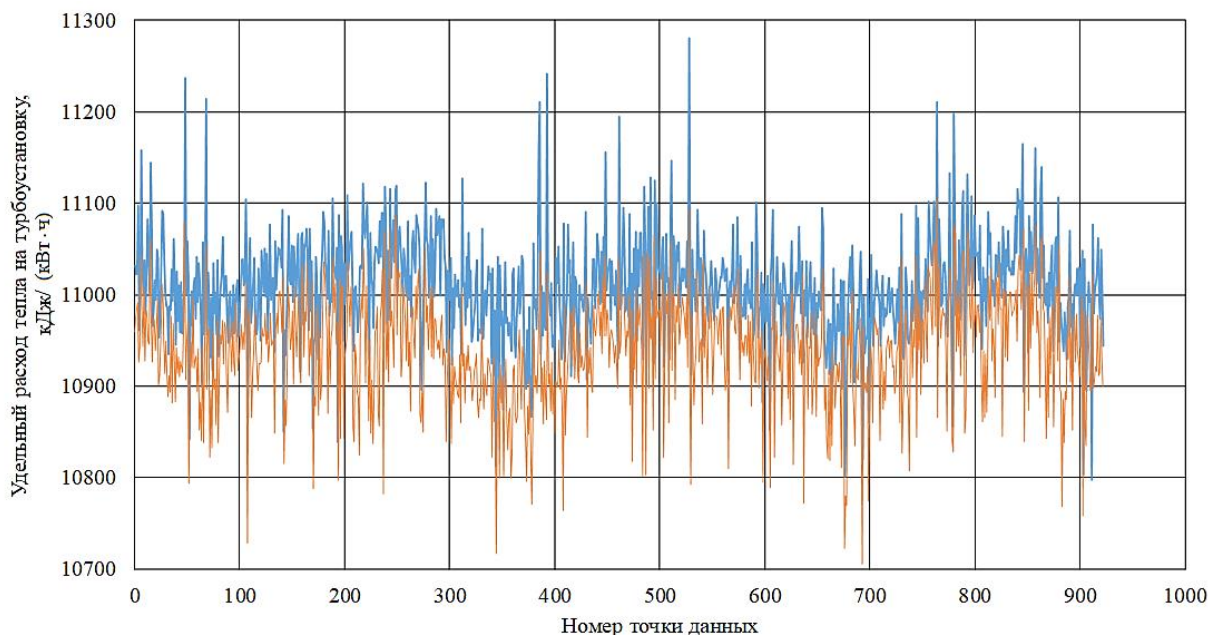


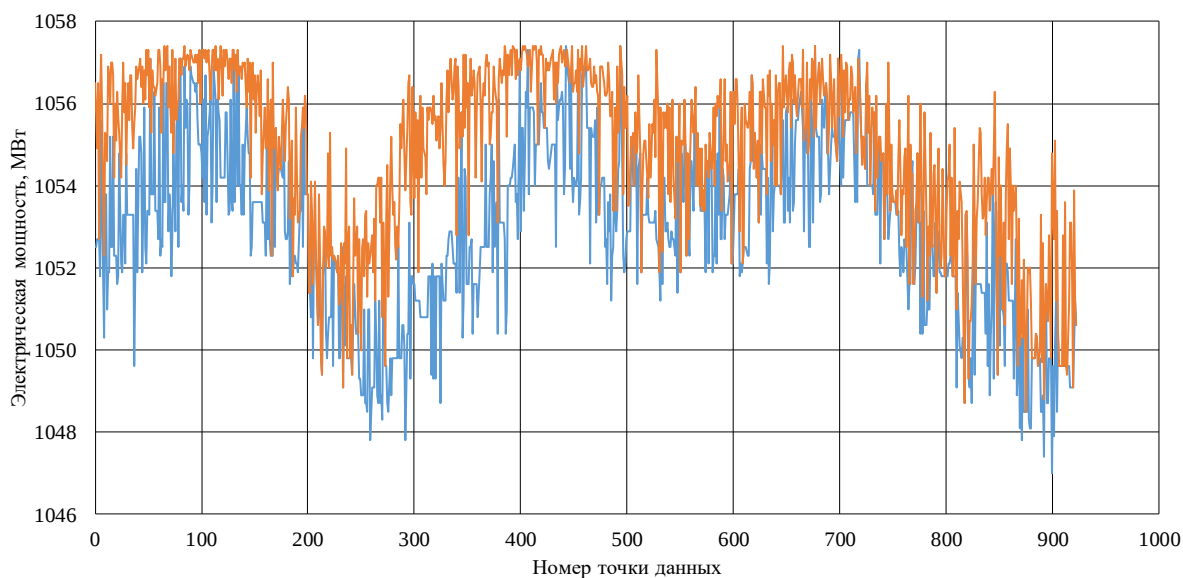
Рисунок 6. Диалоговое окно модуля оптимизации

При проведении оптимизации режима работы ТУ снижение значения целевой функции (УРТ) составило 69,29 кДж/(кВт·ч) или 0,63% (рисунок 7А). При этом электрическая мощность увеличилась в среднем на 2,96 МВт (рисунок 7Б), а снижение затрат электрической энергии на собственные нужды ТУ составило 0,21 МВт.

Проведен расчет прогнозного изменения выручки электростанции (таблица 3) за период с 01.01.2022 по 31.12.2022 г. при работе 4 энергоблока с параметрами, рекомендованными по результатам проведения оптимизации. При этом стоимостные факторы принимались в ценах 2024 года. При этом прирост выручки от реализации дополнительно выработанной электрической энергии мог составить ~42,7 млн. руб., от экономии топлива – ~31,3 млн. руб.



А)



Б)

— базовые значения;
— расчетные значения

Рисунок 7. Изменение УРТ (А) и электрической мощности (Б) при оптимизации режима работы турбоустановки

Таблица 3. Изменение выручки предприятия по результатам оптимизации

Наименование показателя	Величина	Размер.
<u>Анализ по выработке электрической энергии</u>		
Дополнительная выработка электроэнергии	27 769 200	кВт·ч
Выручка от реализации электроэнергии	42 686 046	руб.
<u>Анализ по УРУТ</u>		
Экономия топлива в единицах удельного расхода условного топлива	1 953 776	кг у. т.
Экономия на топливе	31 260 421	руб.
<u>ИТОГО</u>		
Рост выручки предприятия	73 946 467	руб.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы и результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ и подбор целевых функций для оптимизации режима работы действующих ТУ ЭС с использованием НС моделей. В результате исследования в целях уточнения и дублирования расчетных характеристик АСУ ТУ определены следующие целевые функции: УРП, УРУТ и УРТ. При этом на основе анализа технической литературы в качестве ключевой целевой функции при проведении оптимизации режима работы действующих ТУ определен УРТ.

2. Разработана аналитическая модель ТУ К-1000-60/3000 энергоблока АЭС проекта ВВЭР-1000/320, основанная на уравнениях теплового и материального баланса и позволяющая производить расчет целевых функций. На основе аналитической модели произведен расчет для всех точек промышленного эксперимента, проведенного на ТУ К-1000-60/3000.

3. Разработан алгоритм, необходимый для создания НС моделей ТУ ЭС с использованием методов статического анализа: кластерного и факторного анализа. Выполнена апробация и программная реализация алгоритма создания НС моделей путем разработки НС модели ТУ К-1000-60/3000. Средняя погрешность результатов расчета при валидации не превышает 1%. С учетом погрешности приборов учета, общая погрешность не превышает 3%.

4. Разработан алгоритм повышения эффективности ТУ с использованием НС моделей ТУ. Выполнена апробация и программная реализация алгоритма повышения эффективности с использованием данных промышленного эксперимента, проведенного на ТУ К-1000-60/3000: при проведении расчета наблюдается снижение значений УРТ и затрат электрической энергии на СН ТУ при увеличении выработки электрической энергии.

5. Выполнена оценка эффективности использования разработанных алгоритмов: программные модули НС модели и алгоритма оптимизации ТУ К-1000-60/3000 могут быть рекомендованы к использованию в режиме реальной эксплуатации. Прогнозируемое снижение УРТ за период промышленного эксперимента (2022 год) на ТУ К-1000-60/3000 могло составить в среднем 69,19 кДж / (кВт·ч) (0,63 %), что привело бы к снижению затрат на УРУТ альтернативной электрической станции и экономии денежных средств в размере 31,2 млн. руб., а прирост мощности – 2,96 МВт (0,29 %), что в денежном эквиваленте составляет 25,7 млн. руб.

Представленные в исследовании методики, программные модули в составе программного комплекса рекомендованы к внедрению на 4 энергоблоке Калининской АЭС. Также с использованием методик могут быть разработаны аналогичные программные комплексы для любой ТУ ЭС.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Перспективными направлениями являются разработка НС моделей энергоблоков ЭС (объединение моделей систем в единый программный продукт),

разработка таких моделей для целей оценки надежности работы ТУ, вспомогательного оборудования и энергоблоков ЭС в целом, а также создание более совершенных алгоритмов оптимизации режимов работы ТУ, например, объединяющих НС модели котельной или реакторной установки и их вспомогательных систем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Нагорная, О.Ю. Разработка модели утилизационной газовой турбины / О.Ю. Нагорная, В.А. Горбунов, А.А. Павлов, **П.А. Минеев** // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2022. – №3. – С.5-12.

2. Горбунов, В.А. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса / В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, Н.А. Лоншаков, С.Г. Андрианов, М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев** // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2022. – №4. – С.14-23.

3. Андрианов, С.Г. Определение удельного расхода условного топлива для оценки энергетической эффективности Атомных электрических станций / С.Г. Андрианов, В.А. Горбунов, **П.А. Минеев**, М.Н. Мечтаева, С.С. Теплякова // Вестник МЭИ. – Москва, 2025. – №2. – С. 128-135.

4. **Минеев, П.А.** Разработка нейросетевой модели паротурбинной установки АЭС / **П.А. Минеев**, В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, М.Н. Мечтаева // Надежность и безопасность энергетики. – Москва, 2025. – №2. – С. 112-121.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus

5. Горбунов, В.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению турбопитательными насосами Калининской АЭС / В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев** // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2024. – №3. – С.125-140.

Статьи в других изданиях

6. Теплякова, С.С. Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС / С.С. Теплякова, В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев** // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – НиНо, 2024. – № 3. – С.48-61.

Результаты интеллектуальной деятельности

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617497 Россия, Программа для определения показателей эффективности паротурбинной установки К-1000-60/3000 : заявл. 13.03.2025 : опубл. 26.03.2025 / **П.А. Минеев**, В.А. Горбунов.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025665520 Россия, Программа для оптимизации паротурбинной установки К-1000-

Тезисы и полные тексты докладов конференций

9. **Минеев, П.А.** Анализ эффективности подходов к повышению производительности паровых турбин АЭС / **П.А. Минеев**, рук. В.А. Гобунов // Энергия-2022: тезис докл. – Иваново, 2022. – С. 27.

10. Нагорная, О.Ю. Верификация детерминированной модели турбины ГУБТ-25 / О.Ю. Нагорная, В.А. Горбунов, **П.А. Минеев** // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: докл. МНПК. – Балаково, 2022. – С.116-121.

11. Мечтаева, М.Н. Исследование взаимного влияния местных сопротивлений на гидравлические характеристики тракта основного конденсата и питательной воды / М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев**, В.А. Горбунов // XXII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2023. – С.128-130.

12. Горбунов, В.А. Оценка влияния осушки пара за счет тепловой и механической энергии / В.А. Горбунов, **П.А. Минеев**, М.Н. Мечтаева // XXII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2023. – С.133-137.

13. Горбунов, В.А. К вопросу учета влияния влажности рабочего тела на процессы, протекающие в турбинах / В.А. Горбунов, **П.А. Минеев**, М.Н. Мечтаева // XXII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2023. – С.137-140.

14. Мечтаева, М.Н. К вопросу повышения эффективности вакуумной системы паротурбинной установки / М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев**, В.А. Горбунов // XXII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2023. – С.143-146.

15. **Минеев, П.А.** Разработка автоматизированного расчета турбины с влажным паром / **П.А. Минеев**, рук. В.А. Горбунов // Энергия-2023: тезис докл. – Иваново, 2023. – С. 33.

16. **Минеев, П.А.** Аспекты динамического теплового расчета ПТУ АЭС на основе экспериментальных данных / **П.А. Минеев**, рук. С.Г. Андрианов // Энергия-2023: тезис докл. – Иваново, 2023. – С. 34.

17. Горбунов, В.А. Кластерный и факторный анализ в процессе промышленного эксперимента на Калининской АЭС / В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев** // XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике: тезис докл. – Нижний Новгород, 2023. – С.252-254.

18. Горбунов, В.А. Цифровые двойники тепломеханического оборудования второго контура АЭС / В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева, **П.А. Минеев** // XIII семинар вузов по теплофизике и энергетике: тезис докл. – Нижний Новгород, 2023. – С.254-256.

19. **Минеев, П.А.** К вопросу о разработке нейросетевой модели ПТУ / **П.А. Минеев**, О.Ю. Нагорная, рук. В.А. Горбунов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезис докл. МНТК. – Москва, 2024. – С.888.

20. **Минеев, П.А.** Анализ возможностей исследования влияния влажности в паровых турбинах АЭС с использованием средств CFD / **П.А. Минеев**, рук. В.А. Горбунов // Энергия 2024: тезис. докл. МНТК. – Иваново, 2024. – С.21.

21. **Минеев, П.А.** Способы повышения энергетической эффективности оборудования системы регенерации АЭС с реакторами типа ВВЭР / П.А. Минеев, В.А. Горбунов // Научный аспект. – Т.23. – №5, 2024. – С.3073-3078.

22. **Минеев, П.А.** Определение критериев оптимизации работы второго контура АЭС с реакторами типа ВВЭР / П.А. Минеев, В.А. Горбунов, М.Н. Мечтаева // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – Т.9. – №8, 2024. – С.143-148.

23. **Минеев, П.А.** Исследование влияние уровня конденсата в поверхностных подогревателях системы регенерации на эффективность АЭС // АЭСиУ МНТК МЭИ 2025. – Москва: НИИ «Московский энергетический институт», 2025. – С. 842.

24. **Минеев, П.А.** Оценка возможности повышения мощности энергоблока АЭС при работе на мощностном эффекте // АЭСиУ МНТК МЭИ 2025. – Москва: НИИ «Московский энергетический институт», 2025. – С. 843.

25. **Минеев, П.А.** Анализ базовых принципов моделирования турбоустановок с использованием нейросетевых технологий // XXIII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2025. – С. 82-87.

26. **Минеев, П.А.** К вопросу оптимизации работы турбоустановок // XXIII Бенардосовские чтения: докл. МНТК. – Иваново, 2025. – С. 87-91.

МИНЕЕВ Павел Алексеевич
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ТУРБОУСТАНОВОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 17.10.2025 г. Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,25 Тираж 100 экз. Заказ № 68.
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» 153003, г. Иваново,
ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ