

Утверждаю
Проректор по научной работе и
инновационной деятельности
ФГБОУ ВО
«Южно-Российский государственный
политехнический университет
(НПИ) имени М.И. Платова»

кандидат технических наук, доцент
В.С. Пузин
2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» на диссертационную работу Лысенко Дмитрия Сергеевича на тему: «Нейро-нечеткий алгоритм адаптации регулятора системы управления теплогенерацией котла-утилизатора», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Актуальность диссертационного исследования

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности теплогенерирующего оборудования в условиях возрастающих требований к экономичности и надёжности теплоснабжающих систем. Котлы-утилизаторы, используемые для утилизации теплоты отработанных газов газотурбинных установок, являются важными элементами таких систем и функционируют в условиях выраженной нелинейности и нестационарности технологических процессов теплогенерации. При этом подавляющее большинство действующих систем автоматического управления опираются на линейные ПИД-регуляторы, эффективность которых существенно снижается при изменении режима работы котла-утилизатора.

Развитие методов искусственного интеллекта открывает возможности применения нейронных сетей и нечёткой логики для решения задач моделирования, идентификации и адаптивного управления сложными теплообменными установками. Однако существующие исследования либо ориентированы на лабораторные модели, либо не учитывают реальные

Сотворил один экземпляр
09.12.25 *А.К. Шихов* 1

ФГБОУ ВО «Саратов»
"09" декабря 2025
Вход. № 5/4

эксплуатационные данные, либо требуют экспертного формирования правил и структур моделей, что ограничивает практическую применимость.

Таким образом, исследование Лысенко Д.С. посвящено актуальной задаче разработки комплексного подхода, включающего построение динамической нейросетевой модели котла-утилизатора на основе эксплуатационных данных, идентификацию приближённых моделей, а также создание нейро-нечёткого алгоритма адаптации коэффициентов ПИД-регулятора. Решение этих задач позволит повысить точность поддержания тепловых режимов и обеспечить снижение расхода газа на тепловых электростанциях, что определяет как научную, так и прикладную значимость исследования.

Общая характеристика работы

Диссертация включает в себя: введение, 4 главы, заключение, список использованных источников из 237 наименований, 3 приложения. Полный объем диссертации составляет 144 страницы (с приложениями).

Во введении обоснована актуальность темы исследования, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и публикациях, а также соответствие диссертации паспорту специальности 2.3.3.

В первой главе рассмотрены особенности технологического процесса теплогенерации котла-утилизатора, проанализирована структура объекта управления, факторы, влияющие на динамику температуры сетевой воды, и существующие схемы совместной работы с другим оборудованием в составе ТЭЦ. Обоснована необходимость адаптации ПИД-регулятора в реальных условиях эксплуатации. Приведён детальный обзор методов моделирования теплообменных аппаратов, способов структурной и параметрической идентификации, а также современных методик настройки ПИД-регуляторов. Показаны ограничения традиционных подходов и обоснована применимость нейросетевых и нечётких моделей для задач адаптивного регулирования.

Во второй главе исследована пространственно-распределённая модель котла-утилизатора и выявлены факторы, требующие учёта при построении динамической модели. На основе архивных эксплуатационных данных разработана рекуррентная нейросетевая модель (NARX), способная точно воспроизводить изменение температуры сетевой воды в различных режимах работы газотурбинной установки — разгон, номинальная нагрузка и останов.

Оценена точность модели, подтверждена её применимость для дальнейшей идентификации и адаптации регулятора.

В третьей главе разработана система управления теплогенерацией котла-утилизатора, включающая процедуры идентификации приближённых моделей, расчёт оптимальных коэффициентов ПИД-регулятора и создание нечёткого алгоритма адаптации. При помощи частотных характеристик нейросетевой модели выполнена структурно-параметрическая идентификация моделей для различных режимов. На основе полученных моделей рассчитаны наборы коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающие требуемые показатели качества. Описан нечёткий алгоритм выбора коэффициентов в зависимости от фактического режима функционирования котла.

В четвёртой главе приведена методика автоматизации расчёта коэффициентов ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей. Рассмотрены процедуры формирования обучающего набора данных, выбор архитектуры нейронной сети, предложена структура реализации вычислительной процедуры на промышленном контроллере в темпе процесса. Показано, что применение нейронных сетей позволяет исключить трудоёмкий экспертный подбор параметров и обеспечить обновление базы правил нечёткого адаптера в условиях изменения свойств объекта.

В заключении сформулированы основные результаты исследования, подтверждена эффективность предложенных моделей и алгоритмов для повышения точности поддержания тепловых режимов и снижения расхода газа. Указаны направления дальнейшего развития, включая расширение структур моделей и интеграцию адаптивных алгоритмов в промышленные АСУ ТП.

В приложениях представлена дополнительная информация: данные, собранные в процессе эксплуатации установки, фрагменты программной генерации обучающих выборок и обучения нейронных сетей, а также копии актов об использовании результатов диссертационного исследования.

Новизна полученных результатов и их соответствие паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Диссертация включает новые результаты, соответствующие следующим пунктам паспорта специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

1) На базе рекуррентных нейронных сетей разработана многомерная динамическая модель котла-утилизатора, которая, в отличие от известных позволяет воспроизводить процессы теплообмена в условиях изменения

нелинейных и нестационарных характеристик и режимов работы котла-утилизатора с повышенной точностью (П8: «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников»).

2) Разработаны методики идентификации приближённой модели по частотным и переходным характеристикам, которые, в отличие от известных включают процедуру идентификации структуры приближенной модели (П8: «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников»).

3) На базе нечёткой логики разработан алгоритм адаптации ПИД-регулятора, который, в отличие от известных позволяет на основе аналитического расчёта найти коэффициенты регулятора, оптимальные по заданному критерию качества в зависимости от режима работы технологической установки (П6: «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами»)

4) Разработана базирующаяся на предлагаемых методиках структурно-параметрической идентификации приближенной модели объекта система управления процессом теплогенерации котла-утилизатора с нейро-нечетким алгоритмом адаптации ПИД-регулятора, которая обеспечивает большую по сравнению с известными структурами точность стабилизации заданного температурного режима технологической установки (П3: «Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.»).

Теоретическая значимость диссертации

Теоретическая значимость диссертационного исследования Лысенко Дмитрия Сергеевича заключается в развитии научных основ построения алгоритмов адаптации систем автоматического управления на базе интеллектуальных технологий.

Научные положения исследования формируют основу для дальнейших разработок в области интеллектуальных методов адаптации систем автоматического управления, обеспечивая теоретическую базу для создания более универсальных и формализованных алгоритмов настройки регуляторов для сложных теплоэнергетических объектов.

Практическая значимость работы для науки и производства, рекомендации по использованию полученных в диссертации результатов

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в создании прикладных методов адаптации ПИД-регуляторов на основе интеллектуальных технологий, ориентированных на реальные условия эксплуатации котлов-утилизаторов. Полученные решения могут быть интегрированы в промышленные АСУ ТП без изменения существующей архитектуры контуров регулирования.

Созданные модели и методики могут применяться при проектировании, модернизации и разработке систем управления теплоэнергетическими установками, а также при реализации систем автоматической настройки регуляторов. Преимущество предложенного подхода заключается в обеспечении требуемого качества переходных процессов в условиях нелинейности и нестационарности параметров объекта, а также в исключении необходимости ручного подбора настроек специалистом. Использование частотных характеристик нейросетевой модели обеспечивает корректность и повторяемость процедуры расчёта коэффициентов регулятора.

Рекомендуется применять результаты исследования при разработке адаптивных подсистем автоматического регулирования для котлов-утилизаторов и других теплообменных агрегатов, работающих в переменных режимах. Методики могут быть использованы в энергетических компаниях и инженерных организациях при создании интеллектуальных модулей настройки регуляторов, а также в исследовательской практике — для верификации и калибровки моделей технологических процессов.

Практическая ценность полученных результатов подтверждается использованием на предприятии ООО «Энергостандарт» при разработке систем управления котлоагрегатов, а также внедрением в учебный процесс кафедры «Автоматика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Управление в технических системах»

Считаем целесообразным продолжить в Самарском государственном техническом университете развитие тематики исследования в направлении расширения интеллектуальных методов адаптации для более широкого класса теплоэнергетических и технологических объектов, включая усложнение моделей, совершенствование алгоритмов выбора параметров регуляторов и интеграцию разработанных подходов в промышленные АСУ ТП.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы определяется вычислительными экспериментами, подтверждающими основные теоретические положения работы и не противоречащими известным положениям в данной области исследований. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 печатных работах, среди которых 5 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Основные положения и результаты исследования докладывались на следующих научно-технических конференциях: XXI Международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (сентябрь, 2019 г.); Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (сентябрь, 2020 г., сентябрь, 2022 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (май, 2021 г., май, 2022 г.); XII международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (декабрь, 2021 г.); VII Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (ноябрь, 2023 г.). XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (май, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (июнь, 2020 г., июнь 2022 г.); XIV Всероссийская научная конференция молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» (декабрь 2020 г.); XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических систем» (июнь 2021 г.)

Замечания по диссертационной работе

1) При построении нейросетевой модели не указано, каким образом обеспечивалась устойчивость обучения при наличии значительных различий в масштабе входных переменных, и отсутствует описание процедуры нормализации данных.

2) В диссертации отсутствует обоснование выбора структуры нечёткого вывода типа Сугено при разработке алгоритма адаптации коэффициентов ПИД-регулятора, а также не указаны критерии выбора структуры в контексте рассматриваемой задачи.

3) В третьей главе детально описаны процедуры синтеза нечёткого адаптера, однако не приводится формальная оценка устойчивости замкнутой системы при переходе между набором параметров ПИД-регулятора, что требует отдельного анализа.

4) Для алгоритма адаптации ПИД-регулятора приведено сравнение только с базовым ПИД-регулятором, тогда как включение хотя бы одного адаптивного или предиктивного аналога повысило бы достоверность сравнительной оценки.

5) Описывая применение модели в среде компьютерного моделирования динамических систем MATLAB\Simulink, автор не приводит структуру схемы и настройки блоков, что усложняет повторное воспроизведение экспериментов читателем.

Следует отметить, что вышеописанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования в целом и не снижают ценности проведенных исследований и полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Лысенко Дмитрия Сергеевича на тему «Нейро-нечеткий алгоритм адаптации регулятора системы управления теплогенерацией котла-утилизатора» является значимым вкладом в область интеллектуальных методов адаптации систем автоматического управления. Исследование демонстрирует высокий уровень теоретической и практической подготовки автора, который применяет современные технологии для решения актуальных задач в управлении сложными теплоэнергетическими объектами.

В целом диссертация Лысенко Д.С. является целостной завершенной научно-квалификационной работой. Научные положения диссертации Лысенко Д.С. соответствуют требованиям паспорта специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

По актуальности, научной новизне и практической ценности полученных результатов, их достоверности и обоснованности, уровню апробации, диссертационная работа соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Лысенко Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на работу рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО

«Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова» (протокол № 3 от 25 ноября 2025 г.)

Заведующий кафедрой
«Автоматика и телемеханика»
ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени
М.И. Платова», к.т.н., доцент

Дьяченко Владимир Борисович

Контактные данные: адрес: 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул.
Просвещения, 132. телефон: (863) 525-55-97. e-mail: vbdyach@mail.ru

Профессор кафедры
«Автоматика и телемеханика»
ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени
М.И. Платова», д.т.н., профессор

Лачин Вячеслав Иванович

Подписи Лачина В.И., Дьяченко В.Б. заверяю

Ученый секретарь
ученого совета ЮРГПУ(НПИ)



Н.Н. Холодкова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Адрес: 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Телефон: (8635) 25-53-94

E-mail: rektorat@npi-tu.ru