

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
Пермского национального исследовательского
политехнического университета

Швейкин А.И.

«26» 1 марта 2025 г.

М.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий» выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Автоматика и телемеханика».

В 2019 году соискатель Никулин Вячеслав Сергеевич окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 27.04.04 Управление в технических системах. В 2023 г. окончил аспирантуру очной формы обучения Пермского национального исследовательского политехнического университета по направлению подготовки 27.06.01 Управление в технических системах.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Южаков Александр Анатольевич, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

По итогам обсуждения представленной работы принято следующее заключение.

Диссертация Никулина Вячеслава Сергеевича посвящена разработке и реализации метода управления расходом топлива с целью снижения выбросов оксидов азота в малоэмиссионной камере сгорания ГТД. Он основан на новых способах и структурах нейросетевых измерителей, учитывающих ограничения вычислительных мощностей и требования работы в «жестком реальном времени».

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- проведен обзор современных подходов к измерению и управлению выбросами оксидов азота;

- предложен метод управления концентрацией эмиссии оксидов азота, основанный на оценке состояния устойчивости работы камеры сгорания, соответствующий требованиям систем «жесткого реального времени» и учитывающий влияние внешней среды, реализованный на базе нейросетевого подхода;

- разработан способ построения и структурной организации виртуальных измерителей температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики и эмиссии оксидов азота на базе персептрона, разработанных с использованием нейросетевого подхода и учитывающих адаптацию к режимам работы газотурбинного двигателя;

- предложен новый подход к коррекции расхода топлива в топливных коллекторах, учитывающий переходные режимы и обеспечивающий устойчивую работу камеры сгорания, основой которого служит регулятор концентрации оксидов азота, интегрированный в систему автоматического управления газотурбинным двигателем;

- выполнено внедрение разработанной системы автоматического управления концентрацией эмиссии оксидов азота и виртуальных измерителей температуры камеры сгорания, оксидов азота и регулятора в систему управления ГТД повышенной тяги.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- разработан оригинальный метод управления концентрацией оксидов азота, опирающийся на анализ устойчивости режимов работы камеры сгорания, ключевой особенностью является применение нейросетевого подхода для оценки концентрации, что позволило сократить потребление вычислительных ресурсов;

- предложен способ построения и структуры адаптивных виртуальных нейросетевых измерителей температуры в камере сгорания и эмиссии оксидов азота. В процессе эксплуатации автоматически корректируются калибровочные коэффициенты измерителей, что позволяет получать точные данные в «жестком реальном времени»;

- разработан способ коррекции расхода топлива в коллекторах с учетом переходных режимов и устойчивой работы камеры сгорания за счет введения обратной связи по значениям эмиссии оксидов азота в систему автоматического управления ГТД, что позволило существенно снизить выбросы оксидов азота.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Полученные в диссертации результаты не противоречат теоретическим положениям, известным из публикаций других авторов, подтверждаются результатами научных расчетов, математического моделирования и верификации полученных результатов, а также экспериментальными данными полученными в ходе внедрения САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД повышенной тяги.

4. Практическая значимость исследования:

Предложенные решения позволили обеспечить эмиссию оксидов азота в пределах 18 кг за взлётно-посадочный цикл, удовлетворяя международным требованиям. Эксперименты показали рост эффективности на 4,5% в штатных условиях и до 81% при комплексных испытаниях с учётом внешних возмущений и отказов. Адаптивный нечеткий виртуальный измеритель температуры сократил инерционность измерений на 5–7% относительно термопары и снизил среднее квадратическое отклонение (СКО) практически в 10 раз, а адаптивный виртуальный измеритель оксидов азота увеличил точность оценки концентрации в 170 раз при минимальном приросте времени 0,36 мс, уменьшая число вычислительных операций до 89,8%. Полученные результаты интегрированы в систему управления ГТД повышенной тяги (подтверждено актами внедрения АО «ОДК-СТАР») и внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика и телемеханика» ПНИПУ.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:

По материалам диссертационной работы опубликовано 15 научных работ, в том числе 7 статей в журналах перечня ведущих рецензируемых научных изданий, в том числе 3 статьи индексированы в международной базе цитирования *Scopus*, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Никулин, В. С. Виртуальный измеритель температуры камеры сгорания на базе нечеткой логики / В. С. Никулин, С. А. Сторожев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 47. – С. 71-84. – DOI 10.15593/2224-9397/2023.3.04.

Представлен виртуальный измеритель температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя на основе нечеткой логики взамен термопары. Разработан и реализован новый подход, учитывающий оптимизацию вычислительных затрат. Проведено моделирование в среде Simulink, предложен блок адаптации, обеспечивающий повышение точности при изменяющихся режимах работы. Результаты подтверждают эффективность предложенного решения. (Вклад соискателя 50%).

2. Никулин, В. С. Модификация сети *ANFIS* / В. С. Никулин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника,

информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 178-193. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.2.09.

Предложена модификация алгоритма построения адаптивного нейронечеткого регулятора на базе ANFIS-сети для управления недетерминированными объектами. Разработан адаптивный фаззификатор с перемещающимися треугольными функциями принадлежности. Проведено моделирование в среде Simulink. Показано сокращение времени переходного процесса более чем на 9,5 % и улучшение характеристик системы управления ГТД. (Вклад соискателя 100%).

3. Никулин, В. С. Виртуальный адаптивный векторно-матричный измеритель окислителя камеры сгорания газотурбинного двигателя / В. С. Никулин, Ю. Н. Хижняков, С. А. Сторожев // Труды МАИ. – 2021. – № 121. – DOI 10.34759/trd-2021-121-21.

Представлен адаптивный нейро-нечеткий измеритель коэффициента избытка воздуха камеры сгорания ГТД, основанный на векторно-матричном подходе. Разработаны аналитические предикаты и предложены алгоритмы логического вывода с использованием полиномов Сугено. Показан практический пример использования при решении задачи адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. (Вклад соискателя 50 %).

4. Адаптивный виртуальный измеритель вредных веществ в камере сгорания ГТД с применением нечеткой технологии / В. С. Никулин, С. А. Сторожев, Д. М. Абдуллин, Ю. Н. Хижняков // Труды МАИ. – 2021. – № 116. – С. 11. – DOI 10.34759/trd-2021-116-11.

Представлен виртуальный адаптивный измеритель концентрации оксидов азота в камере сгорания ГТД, основанный на нечеткой технологии. Разработана система автоматического управления перераспределения топлива в коллекторах на базе нейросетевого подхода для оценки параметров горения и количества выбросов. Моделирование показало снижение выбросов оксидов азота в соответствии с международными требованиями. Соискателем были проведены эксперименты, результаты которых показали преимущества разработанных модели и алгоритма. (Вклад соискателя 50%).

Основные статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus:

5. Система автоматического управления расходом топлива камеры сгорания с изменяющимися условиями эксплуатации на базе виртуального измерителя оксидов азота / В. С. Никулин, С. А. Сторожев, Ю. Н. Хижняков, А. А. Южаков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 5. – С. 251-258. – DOI 10.17587/mau.25.251-258.

Представлены результаты разработки системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя с учётом изменяющихся условий эксплуатации. Ключевым элементом системы является виртуальный измеритель оксидов азота (NO_x), основанный на нейронных сетях, позволяющий оценивать выбросы в реальном времени. Соискателем проведены исследования, которые подтвердили эффективность подхода в снижении эмиссии NO_x . (Вклад соискателя 30 %).

6. An Adaptive Fuzzy Gas-Turbine Engine Combustion-Chamber Temperature Meter /V. S. Nikulin, A. A. Yuzhakov, Yu. N. Hizhnyakov, S. A. Storozhev // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93, No. 11. – P. 685-689. – DOI 10.3103/s106837122211013x

В данной работе представлена структура адаптивного виртуального измерителя температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя на основе нечеткой логики. Разработан алгоритм адаптации функций принадлежности с использованием уравнений Сугено. Подтверждено снижение инерционности относительно термопары на 5–7 % и соответствие требованиям к точности измерения. Соискателем была построена модель адаптивного виртуального измерителя температуры камеры сгорания газотурбинного двигателя на основе нечеткой логики в инженерном математическом комплексе MATLAB Simulink. (Вклад соискателя 30 %).

7. Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя / В. С. Никулин, О. А. Андриевский, М. Д. Кузнецов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 6. – С. 348-355. – DOI 10.17587/mau.21.348-355.

В работе разработана нейросетевая система управления выбросами NO_x и CO в камере сгорания авиационного ГТД. Построены модели регуляторов на основе алгоритмов Левенберга-Марквардта и Сугено. Проведено моделирование в MATLAB, подтверждено соблюдение экологического норматива - не более 18 кг выбросов за взлетно-посадочный цикл. (Вклад соискателя 30 %).

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, полученные по тематике диссертационной работы:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617356 Российская Федерация. Динамическая модель системы управления эмиссии окислов азота : № 2022616904 : заявл. 20.04.2022 : опубл. 20.04.2022 / В. С. Никулин, А. А. Южаков, Ю. Н. Хижняков, С. А. Сторожев ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Никулиным Вячеславом Сергеевичем диссертационная работа является прикладным научным исследованием в области управления технологическими процессами и производствами и имеет важное значение для развития данного направления науки.

Указанная область исследования соответствует пунктам **5, 12** паспорта научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

п. 5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами.

п. 12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных

и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертационная работа Никулина Вячеслава Сергеевича отвечает требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.: автор, Никулин Вячеслав Сергеевич, корректно ссылается в тексте диссертации на авторов и (или) источники заимствования материалов, в том числе при использовании результатов научных работ, опубликованных лично или в соавторстве.

Диссертация «Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий» **Никулина Вячеслава Сергеевича** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета «24» марта 2025г. (протокол № 11).

Присутствовало на заседании 26 чел. Результаты голосования: «за» – 26 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Заместитель заведующего кафедрой
«Автоматика и телемеханика»,
доктор технических наук, доцент

 / Фрейман В.И./