

Проректор по научн
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
электротехнический университет «ЛЭТИ»

ТВЕРЖДАЮ»

И. А. Семенов
д-р техн. наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина)»

 И. А. Семенов 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» на диссертационную работу Никулина Вячеслава Сергеевича «Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Актуальность темы

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена необходимостью снижения вредных выбросов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) в соответствии с требованиями международных экологических стандартов. Современная авиационная промышленность сталкивается с серьёзными экологическими ограничениями на эмиссию оксидов азота (NO_x) и углерода (CO и CO_2), оказывающих значительное негативное влияние на атмосферу и здоровье населения. Оксиды азота представляют особую опасность, так как способствуют образованию фотохимического смога, кислотных дождей и разрушению озонового слоя Земли, что влечёт долгосрочные последствия для окружающей среды.

Измерение концентраций оксидов азота при эксплуатации авиационных двигателей представляют собой сложную задачу, поскольку традиционные методы анализа не позволяют проводить мониторинг параметров горения непосредственно в реальных полетных режимах на работающих двигателях. Это обуславливает необходимость разработки виртуальных измерителей на базе интеллектуальных технологий, способных оперативно и точно оценивать ключевые параметры, такие как температура в камере сгорания (КС) и концентрация выбросов оксидов азота, в режиме реального времени. Также в

работе представлен оригинальный способ коррекции топлива между коллекторами, обеспечивающие устойчивость работы малоэмиссионной камеры сгорания и снижение уровня токсичных выбросов на всех режимах взлетно-посадочного цикла.

В связи с этим диссертационная работа Никулина В.С., направленная на разработку адаптивных виртуальных измерителей и оригинального метода управления концентрацией эмиссии оксидов азота без необходимости модификации конструкции камеры сгорания, позволяет обеспечить не только соответствие экологическим требованиям, но и устойчивость работы камеры сгорания на всех этапах взлётно-посадочного цикла, что несомненно актуально и придаёт исследованию высокую научную и практическую значимость.

Общая характеристика содержания работы

Во введении представлена характеристика современного состояния проблемы управления эмиссией вредных веществ в авиационных газотурбинных двигателях, сформулирована актуальность исследования, обозначены цель и задачи работы. Подчёркивается ограниченность традиционных методов измерения и управления выбросами в условиях реального времени, а также необходимость создания интеллектуальных систем на основе нейросетевых технологий.

В первой главе выполнен подробный обзор предметной области: рассмотрены типы камер сгорания и особенности малоэмиссионной камеры, описаны зоны горения и режимы срыва пламени, приведены механизмы образования оксидов азота и требования к эмиссии в соответствии с международными стандартами. Проанализированы методы снижения выбросов и существующие математические модели расчета оксидов азота в КС ГТД, выполнена постановка научной задачи.

Во второй главе представлена разработка и синтез методов интеллектуального управления расходом топлива камеры сгорания. Разработаны виртуальные и адаптивные виртуальные измерители температуры и эмиссии оксидов азота на базе нейросетей (персептрона и ANFIS), предложены оригинальные способы построения измерителей, обеспечивающие высокую точность при ограниченных вычислительных ресурсах. Также создана система управления, сочетающая блоки оценки неустойчивых состояний работы КС и регулятор перераспределения топлива между коллекторами.

В третьей главе рассматривается моделирование системы управления эмиссией оксидов азота с учетом предложенного метода управления и

разработанных виртуальных измерителей. Приведен синтез исходной и модифицированной САУ МЭКС в среде Matlab Simulink, включая блоки задания параметров, управления и регуляторов. Описаны экспериментальные исследования, заданы требования к эксперименту, проводимых в различных условиях, включая влияние помех, отказов измерителей и деградации элементов и введена целевая функция.

В четвертой главе представлено внедрение разработанной системы на сертификационном стенде газотурбинного двигателя повышенной тяги предприятия АО «ОДК-СТАР». Полученные экспериментальные данные подтвердили снижение интегрального уровня эмиссии оксидов азота на 4,5%, повышение устойчивости работы камеры и сокращение аппаратных затрат. Также продемонстрировано применение результатов в образовательном процессе.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации. Выводы полностью отражают основные научные достижения автора.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан оригинальный метод управления эмиссией оксидов азота в малоэмиссионной камере сгорания на основе нейросетевой оценки устойчивости горения, обеспечивающий снижение выбросов и функционирование системы в режиме «жесткого реального времени».
2. Предложены новые структуры адаптивных виртуальных измерителей температуры камеры сгорания на основе ANFIS-сети и концентрации оксидов азота на основе персептрона, обеспечивающие высокую точность оценки параметров процесса горения в полетных условиях при ограниченных вычислительных ресурсах регулятора электронного двигателя.
3. Разработан и реализован способ перераспределения топлива между коллекторами камеры сгорания на основе данных виртуальных измерителей, что позволило существенно снизить выбросы оксидов азота и обеспечить устойчивость горения на всех режимах работы двигателя в изменяющихся условиях эксплуатации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается тем, что они не противоречат известным теоретическим положениям,

представленным в публикациях отечественных и зарубежных авторов в области управления эмиссией вредных веществ в газотурбинных двигателях. Экспериментальные исследования, проведённые на сертификационном стенде газотурбинного двигателя повышенной тяги, подтвердили эффективность разработанного способа перераспределения топлива между коллекторами и корректность работы виртуальных измерителей эмиссии и температуры. Результаты апробации показали стабильность процессов горения камеры сгорания, отсутствие срывов пламени и виброгорения, а также снижение интегрального уровня выбросов оксидов азота до требований международных стандартов. Достоверность полученных данных дополнительно подтверждается воспроизводимостью результатов в различных режимах испытаний.

По результатам работы опубликованы 15 научных работ, семь статей из которых – в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных изданий, три – в международных изданиях, индексируемых в базах Scopus, которые в полной мере отображают содержание работы. Новизна и приоритет автора подтверждаются публикациями и докладами на всероссийских и международных конференциях. Автореферат в полной мере отражает основные положения, содержание и выводы диссертации.

Практическая значимость полученных автором результатов

Разработанная система автоматического управления эмиссией оксидов азота на основе нейросетевых виртуальных измерителей показала снижение выбросов на 4,55% в нормальных условиях и до 81% при воздействии внешних возмущений по сравнению с исходным решением, а также обеспечила выполнение требований по выбросам согласно международным стандартам. Кроме того, предложенные методы построения виртуальных измерителей температуры и эмиссии могут быть использованы для создания интеллектуальных систем управления другими параметрами газотурбинных двигателей, требующих работы в режиме «жесткого реального времени». Результаты диссертационной работы Никулина В.С. внедрены в ходе реализации договоров с АО «ОДК-СТАР» в 2019-2021 гг.

Оформление и стиль изложения

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, списка литературы из 128 наименований и приложений на 14 листах. Полный объем диссертации составляет 189 страниц, из которых 175 страниц занимает основной текст диссертации, включающий 83 рисунка и 38 таблиц. Диссертация написана

на профессиональном техническом языке и в достаточной мере сопровождается рисунками и таблицами. Приводимые автором факты и цитаты имеют корректные ссылки на первоисточники. Название, форма и содержание диссертационной работы полностью соответствует специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Замечания

1. При описании архитектуры нейросетевых измерителей не рассмотрено, как возможная неполнота обучающих выборок может повлиять на точность оценки концентрации выбросов в реальных полетных условиях.

2. При построении адаптивных виртуальных измерителей температуры и эмиссии оксидов азота не явно представлено количественное сравнение вычислительных затрат между адаптивными и неадаптивными версиями моделей в условиях реального времени при различных режимах двигателя.

3. В третьей главе при моделировании системы управления в среде Matlab Simulink недостаточно полно обоснован выбор параметров целевой функции и критериев оптимизации.

4. В процессе апробации акцент сделан на снижение выбросов NO_x , но в работе отсутствует анализ влияния новой системы управления на другие эксплуатационные параметры двигателя, такие как удельный расход топлива или ресурс горячих частей.

5. В тексте диссертации требовалось бы более детально аргументировать выбор метода Левенберга-Маквардта для нейронной сети, а также рассмотреть возможности применения других методов именно для выбранной нейронной сети с обоснованием и доказательством значимости снижения вычислительной сложности алгоритмов в сопоставлении с требованиями по точности полученных результатов

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от проделанной работы и полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Никулина Вячеслава Сергеевича «Управление вредными выбросами в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя на основе нейросетевых технологий» представляет собой научно-квалификационное исследование, в котором содержится решение задачи

разработки методов интеллектуального управления процессом горения на основе виртуальных нейросетевых измерителей и системы перераспределения топлива между коллекторами с целью снижения выбросов оксидов азота. Работа имеет важное значение для совершенствования систем автоматического управления газотурбинными двигателями в условиях ужесточающихся экологических требований, обеспечивая устойчивую работу камеры сгорания и снижение выбросов на переходных режимах взлетно-посадочного цикла.

Диссертация выполнена на высоком научном и техническом уровне с использованием современных инструментальных средств и методик, а основные выводы достаточно обоснованы и подтверждены результатами внедрения. Диссертационная работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а также требованиям «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученых степеней, а ее автор Никулин Вячеслав Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на автореферат и диссертацию обсужден и утвержден на расширенном заседании кафедры систем автоматического управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

Протокол № 05/1-2025 от «15» мая 2025 г.

И.о. зав. каф. САУ,
к. т. н., доцент

 Доброскок Н. А.

Ученый секретарь каф. САУ
к. э. н., доцент

 Русяева Т. Л.

Полное наименование организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Адрес: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Телефон: (812) 234-6818, **Сайт организации:** <https://etu.ru>