

Никулин Вячеслав Сергеевич

**УПРАВЛЕНИЕ ВРЕДНЫМИ ВЫБРОСАМИ В МАЛОЭМИССИОННОЙ
КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Южаков Александр Анатольевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Катасёв Алексей Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ», кафедра систем
информационной безопасности, профессор

Гергет Ольга Михайловна
доктор технических наук, доцент,
ФГБУН «Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии
наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова
(Ленина)» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «20» июня 2025 г. в 14:00 на заседании
диссертационного совета Пермского национального исследовательского
политехнического университета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614000, г. Пермь,
Комсомольский проспект, 29, ауд. № 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте
Пермского национального исследовательского политехнического университета
(<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «24» апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д ПНИПУ.05.14,
доктор технических наук, доцент

В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие авиационной промышленности и летательных аппаратов напрямую зависит от реализации систем автоматического управления (САУ) газотурбинными двигателями. В соответствии с «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года» выбросы оксидов азота признаны серьезной проблемой для окружающей среды из-за их пагубного воздействия на качество воздуха и изменение климата. Поскольку авиационная отрасль продолжает развиваться, авиаперелеты становятся все более доступными, растет необходимость совершенствования методов управления концентрацией эмиссией оксидов азота.

Выполнение требований по снижению выбросов предполагает их измерение, но это невозможно по причине отсутствия соответствующих измерительных приборов и технологий в условиях полета. При использовании метода косвенных измерений для обеспечения высокой точности необходимо использовать мощные вычислительные средства, но это затруднительно при практической реализации в существующих регуляторах электронных двигателя (РЭД). Уменьшение требований к вычислительным системам приводит к снижению точности. Задачей диссертационного исследования является создание комплексных систем управления, обеспечивающих снижение вредных выбросов и функционирующих на современных интеллектуальных принципах управления. Это позволит эффективно решить задачу снижения выбросов оксидов азота, экономии и эффективного сжигания топлива, обеспечения тяги, снижения эксплуатационных затрат авиационных ГТД.

Степень разработанности темы. Значимый вклад в исследовании систем автоматического управления (САУ) силовых установок на базе авиационного ГТД внесли отечественные и зарубежные ученые: В.Г. Августинovich, Ф.Д. Гольберг, О.С. Гуревич, Ю.М. Гусев, С.Д. Земляков, Г.Г. Куликов, В.Ю. Рутковский, Б. А. Черкасов, А.А. Шевяков, R. Hill, R. Berry, T. Druce, J.R. Roach, G. Campa A. Saurabh и другие, однако они недостаточно исследовали проблему вредных выбросов.

В работах В.Г. Августинovich, R. Hill, R. Berry, Ю.К. Титова, Ю.М. Гусева при проектировании систем управления ГТД не учитываются требования к управлению камерой сгорания на затрачиваемые ресурсы РЭД, условия работы в «жестком реальном времени», стохастические неопределенности, влияющие на объект управления (переменные параметры температуры, содержание кислорода в атмосфере, давления окружающей среды и т.д.), а также поведение датчиков и исполнительных механизмы (неконтролируемые изменения расхода топлива в дозаторе из-за изменения плотности топлива вследствие изменения температуры или марки топлива), что оказывает существенное влияние на объем выбросов оксидов азота.

Способами измерений концентрации эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД занимались М.Л. Скрябин, Д.П. Ткаченко, Т.С. Мильтон, О.Б. Гаджиев, С.Д. Земляков, W.G. Lamont и др., но используемые в работах способы измерения эмиссии оксидов азота обладают существенными недостатками, а именно: измерения эмиссии оксидов азота осуществляются

только на стационарном испытательном стенде, малая избирательность и большая длительность измерений и т.д. А главное, измерения в условиях полета летательного аппарата не производятся.

Применению нейросетевых регуляторов в алгоритмах управления авиационными двигателями посвящены работы авторов В.И. Васильева, Сигеру Омату, Марзуки Халид, Д. Гроппа, Е.А. Муравьевой, Ю.Н. Хижнякова, А.А. Южакова. В развитие работ данных авторов предлагается введение новых методов адаптации функций принадлежности нейросетевых регуляторов в САУ ГТД.

Поэтому создание модифицированной структуры САУ обеспечивающей управление эмиссией вредных веществ ГТД в режиме «жесткого реального времени», с сохранением газодинамической устойчивости горения в условиях изменения внешней среды и параметров САУ, является актуальным.

Объект исследования – система автоматического управления малоэмиссионной камерой сгорания газотурбинного двигателя (ГТД).

Предмет исследования – метод управления концентрацией выбросов эмиссии оксидов азота в камере сгорания ГТД.

Цель диссертационной работы заключается в разработке метода управления концентрацией выбросов при применении адаптивных нейронных виртуальных измерителей оксидов азота и температуры в условиях «жесткого реального времени» с учетом изменения параметров окружающей среды и системы управления.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели в рамках диссертационной работы были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Проведен анализ принципов измерения и управления выбросами оксидов азота.
2. Разработан метод управления концентрацией эмиссии оксидов азота основанный на оценке состояний «вибrogорения» и «бедного» срыва, отвечающий требованиям систем «жесткого реального времени» с учетом влияния внешней среды и характеристик САУ на базе нейросетевого подхода.
3. Предложен способ построения и структуры виртуальных измерителей температуры камеры сгорания на базе ANFIS-сети и эмиссии оксидов азота на базе персептрона с учетом адаптации к режимам работы ГТД.
4. Разработан способ коррекции расхода топлива в коллекторах с учетом переходных режимов и устойчивой работы камеры сгорания за счет применения регулятора концентрации эмиссии оксидов азота в системе автоматического управления ГТД.
5. 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.

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен оригинальный метод управления концентрацией эмиссии оксидов азота основанный на оценке состояний «вибrogорения» и «бедного» срыва, отличающийся тем, что оценка концентрации производилась с

применением нейронной сети, что позволило сократить затрачиваемые ресурсы РЭД и производить управление концентрацией эмиссии оксидов азота с учетом «жесткого реального времени»;

2. Разработаны способ построения и структуры адаптивных виртуальных нейросетевых измерителей: температуры в первой зоне камеры сгорания и эмиссии оксидов азота, отличающиеся тем, что в процессе эксплуатации камеры сгорания происходит подстройка коэффициентов градуировочной характеристики, что обеспечивает коррекцию оценки эмиссии оксидов азота и температуры с учетом «жесткого реального времени» в полетных условиях при ограниченных ресурсах РЭД.

3. Разработан способ коррекции расхода топлива в коллекторах камеры сгорания отличающийся от известных тем, что перераспределение топлива по коллекторам осуществляется 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 в изменяющихся условиях эксплуатации двигателя.

Теоретическая значимость заключается в совершенствовании методов синтеза систем автоматического управления камерой сгорания авиационного ГТД. Предложенный метод управления камерой сгорания основан на применении оригинального способа и алгоритмов построения виртуальных нейросетевых измерителей оксидов азота и температуры для сложных недетерминированных систем управления ГТД с учетом ограничений вычислительных мощностей и требований работы в «жестком реальном времени». Реализация способа коррекции расхода топлива в коллекторах камеры сгорания позволила учесть изменяющиеся условия эксплуатации, параметры САУ и повысить качество управления эмиссией оксидов азота с сохранением газодинамической устойчивости ГТД.

Практическая значимость. Применение разработанных в диссертации структуры САУ и метода управления концентрацией эмиссии оксидов азота позволило обеспечить выбросы оксидов азота в пределах 18 кг за взлётно-посадочный цикл, согласно требованиям международных стандартов.

По результатам экспериментальных исследований САУ концентрацией эмиссии оксидов азота показала преимущество в 4,55% при нормальных условиях и до 81% в условиях комплексного эксперимента, учитывающего изменяющиеся внешние условия, помехи, деградацию и отказ измерителя расхода топлива G_t , на сертифицированном стенде ГТД.

Реализация адаптивного виртуального нечеткого измерителя температуры камеры сгорания позволила снизить инерционность измерений на 5-7%, а также повысить точность: среднеквадратическая ошибка (СКО) уменьшилась на 89%.

Благодаря применению нового подхода к построению виртуального адаптивного измерителя оксидов азота на базе персептрона удалось осуществлять измерение эмиссии с высокой точностью при незначительном увеличении времени измерения (на 0,36 мс). При этом количество операций при построении нейронной сети на вычислительном устройстве сократилось на

89,8% (с 362 до 37 ед.), что обеспечило выполнение временных ограничений проектируемой системы управления.

Результаты диссертационной работы использованы при проектировании и реализации элементов систем автоматического управления авиационного газотурбинного двигателя (САУ ГТД) повышенной тяги, в рамках договоров с АО «ОДК-СТАР» в 2019-2021 г.

Результаты работы также внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета по направлению подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» в рамках лабораторных практикумов в составе заданий по проектированию интеллектуальных систем управления, для режима реального времени в условиях ограниченных вычислительных мощностей платформы. Проведенные исследования применены в дисциплине «Современные проблемы теории управления» с использованием среды моделирования Matlab Simulink.

Методы исследования:

Выполненные исследования основываются на теории автоматического управления, теории нечеткого управления, теории нейронных сетей, математическом моделировании динамических систем и обработки результатов эксперимента, а также на использовании пакета инженерного математического комплекса Matlab Simulink и подтверждаются результатами внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод управления концентрацией эмиссии оксидов азота основанный на оценке состояний «виброгорения» и «бедного» срыва на базе нейросетевого подхода с учетом «жесткого реального времени» (п. 5 паспорта специальности);

2. Способ построения и структуры виртуальных измерителей температуры камеры сгорания на базе ANFIS-сети и эмиссии оксидов азота на базе персептрона с учетом адаптации к режимам работы ГТД (п. 12 паспорта специальности);

3. Способ коррекции расхода топлива в коллекторах камеры сгорания с учетом переходных режимов и устойчивой работы камеры сгорания за счет введения обратной связи по значениям эмиссии оксидов азота в САУ ГТД (п. 5 паспорта специальности);

4. Результаты внедрения разработанной системы автоматического управления концентрацией эмиссии оксидов азота и виртуальных измерителей температуры камеры сгорания, оксидов азота и регулятора в систему управления ГТД повышенной тяги.

Область исследования соответствует п. 5, 12 паспорта научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Достоверность полученных результатов. 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.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на: XLVI международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2020» (2020 г., Москва), международной конференции «Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (2020 г., Пермь), всероссийской научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (2020 г., Пермь), VII всероссийской научно-практической конференции с международным участием (2021 г., Пермь), международной конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (2021, Пермь), международной конференции IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) (2021 и 2022 г. Санкт-Петербург).

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

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с изложением результатов теоретических и экспериментальных исследований, заключения, списка использованных источников из 128 наименований и 7 приложений. Работа содержит 175 страниц машинописного текста, 83 рисунка, 38 таблиц и приложения на 14 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, объект и предмет исследования, цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, апробация результатов, объем и структура работы.

В первой главе приводится анализ существующих механизмов образования оксидов азота в камере сгорания газотурбинного двигателя за стандартный взлётно-посадочный цикл в условиях нестационарности параметров объекта, влияния внешних климатических факторов и параметров САУ.

Проведен обзор загрязняющих веществ, образующихся при сжигании топлива в газотурбинных авиационных двигателях. Выявлены основные требования к выбросам вредных веществ в соответствии с нормами ИКАО и ГОСТ Р ИСО 10849-2006, определяющими механизмы образования оксидов азота.

Проанализированы современные подходы снижения и наиболее известные мероприятия по предупреждению выбросов окислов азота. Показано, что все существующие методы оценки концентрации оксидов азота основаны на лабораторных испытаниях в стационарных условиях на земле. Это исключает возможность измерения в режиме «жесткого реального времени» в полёте, что

ограничивает возможность контроля эмиссии в реальных эксплуатационных условиях.

Следовательно, возникает необходимость разработки новых методов и алгоритмов измерения концентрации вредных веществ, учитывающих изменяющиеся параметры окружающей среды и динамику работы газотурбинного двигателя.

Во второй главе разработан метод управления концентрацией выбросов NO_x , учитывающий перераспределение топливовоздушной смеси между диффузионным и гомогенными коллекторами, отвечающий требованиям систем «жесткого реального времени» с учетом влияния внешней среды и параметров САУ, на базе нейросетевого подхода. Метод направлен на снижение выбросов без ухудшения газодинамической устойчивости работы камеры сгорания.

Метод снижения оксидов азота (NO_x) направлен на поддержание концентрации эмиссии в допустимых пределах путем регулирования рабочих параметров: коэффициента избытка воздуха в зоне горения камеры сгорания (α_r) и расхода топлива через диффузионный коллектор (G_{TD}). Он обеспечивает стабильность процесса горения в малоэмиссионной камере сгорания (МЭКС) и предотвращает переход в критические режимы, такие как частичный или полный «бедный» срывы и «вибrogорение».

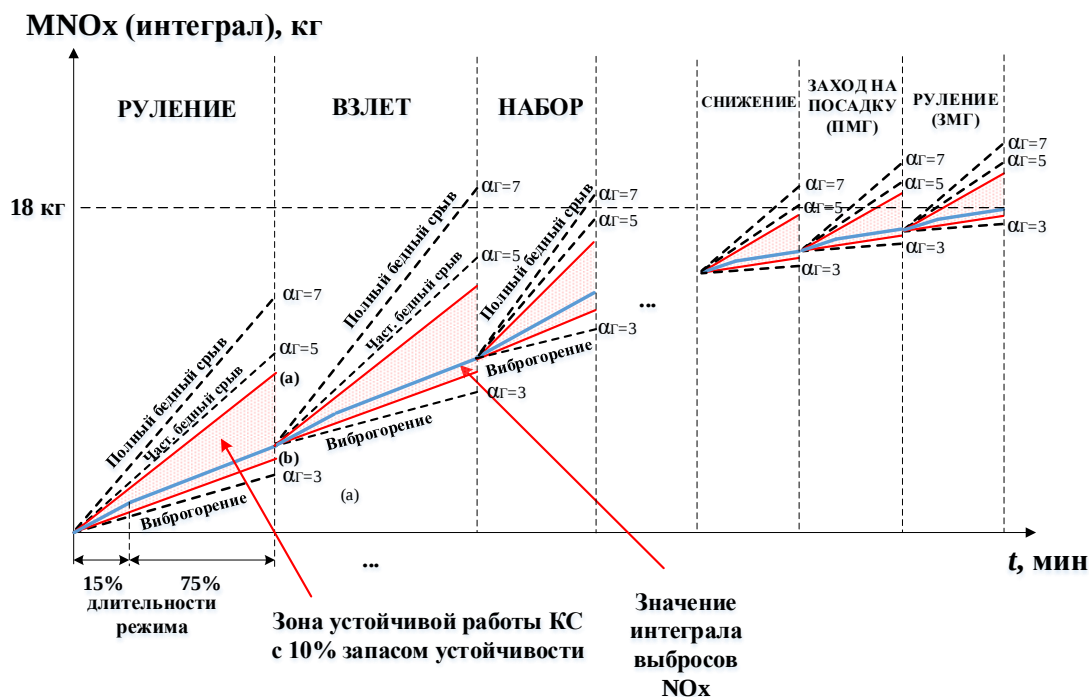


Рисунок 1 – Ограничения по управлению концентрацией оксидов азота и накопление, где $M\text{NO}_x$ – интеграл концентрации оксидов азота

Алгоритм расчета (рисунок 1) интеграла концентрации оксидов азота:

Расчет интеграла $M\text{NO}_x$ выполняется на 15% от длительности режима взлетно-посадочного цикла (ВПЦ) и равен $M\text{NO}_x = (a + b)/2$.

На оставшихся 75% ВПЦ расчет ведется согласно следующему алгоритму:

– при достижении границы (а) (рис. 2.4) – уменьшается G_{TD} на малое приращение (для примера 0.01, определяется точностью измерения датчика расхода топлива);

в «жестком реальном времени» и дополнительного (П) регулятора для 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.

Этот регулятор оперирует входными значениями, где ошибка (e) представляет разницу между желаемыми $\text{NO}_x^{\text{жел.}}$ и текущими значениями $\text{NO}_x^{\text{тек.}}$.

Выход регулятора формируется на основе выражения (1)

$$\Delta G_{tD}^* = (1 + (\text{NO}_x^{\text{жел.}} - \text{NO}_x^{\text{тек.}})) \cdot \Delta G_{tD}, \quad (1)$$

На основании корректирующего значения расхода топлива ΔG_{tD}^* формируется расход топлива через диффузионный и гомогенный коллекторы.

Из вышесказанного можно сделать вывод о необходимости измерения, текущего $\text{NO}_x^{\text{тек.}}$ и желаемого значения $\text{NO}_x^{\text{жел.}}$. Ниже приведена реализация указанных измерителей.

Созданы адаптивные виртуальные измерители: температуры камеры сгорания на базе ANFIS-сети и эмиссии оксидов азота на базе персептрона с учетом адаптации к режимам работы ГТД.

На рисунке 3 приведена структурная схема системы управления ГТД с применением адаптивного виртуального измерителя оксидов азота.

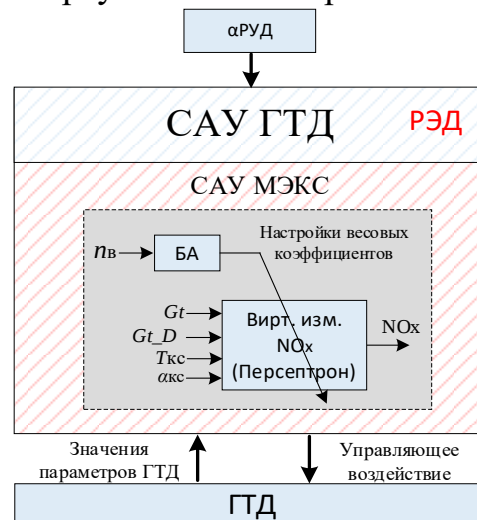


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления ГТД с применением адаптивного виртуального измерителя оксидов азота,

где n_b – частота вращения ротора свободной турбины (вентилятора) ГТД;
 G_t – суммарный расход топлива; $P_{кс}$ – давление за контуром высокого давления (КВД); G_{tD} – суммарный расход топлива через диффузионные коллекторы;
 $T_{кс}$ – температура камеры сгорания; $\alpha_{кс}$ – коэффициент избытка воздуха камеры сгорания; NO_x – концентрация выбросов оксидов азота

Проблема заключается в том, что обучающая выборка содержит большое количество данных для разных режимов, что снижает точность работы нейронной сети. Для решения этой проблемы предложен способ адаптации, который корректирует весовые коэффициенты (рисунок 4) в зависимости от текущего режима ВПЦ, что позволяет снизить вычислительные затраты РЭД и повысить точность измерений.

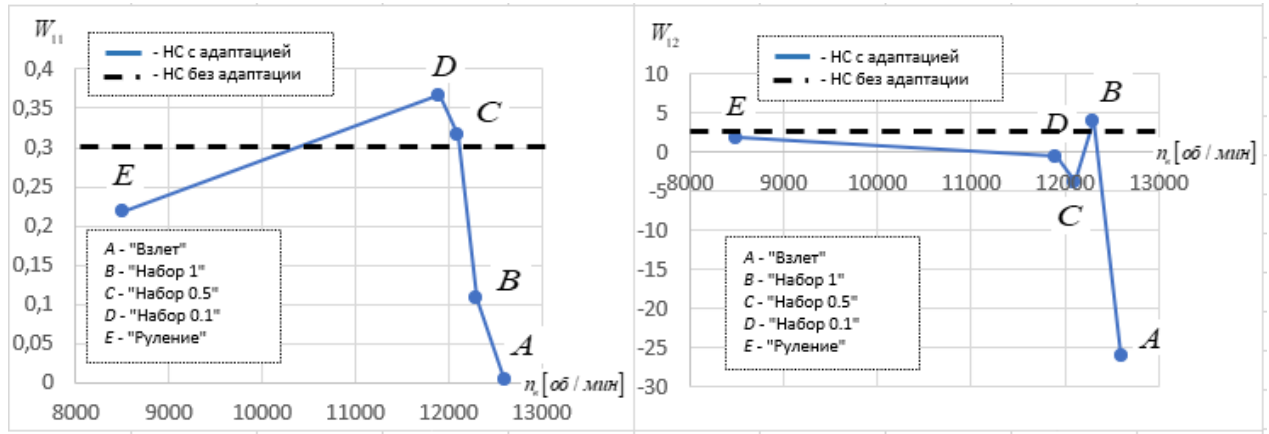


Рисунок 4 – Зависимости изменения весовых коэффициентов скрытого слоя виртуального измерителя от оборотов ГТД

Благодаря применению нового подхода к построению виртуального адаптивного измерителя оксидов азота на базе персептрона, описанного выше, удалось увеличить точность в 170 раз по отношению к системе, где использован неадаптивный преобразователь, при незначительном увеличении времени измерения на 0.36 мс.

В качестве альтернативы термопаре предлагается использовать виртуальный адаптивный измеритель температуры камеры сгорания, поскольку недостатками термопары являются её инерционность измерений и риск прогорания датчика при работе в условиях высоких температур.

Аналогичным образом реализована адаптация виртуального измерителя температуры на основе нечеткой логики, где на базе ANFIS-сети корректируются основания терм-множеств, что повышает точность оценки температуры в камере сгорания и позволяет снизить инерционность термопары.

Для описания фаззификации используются треугольные термы множества класса Т, поскольку являются наиболее простыми в вычислении.

Математическое описание треугольных термов, основания которых равны интервалу 0-1, выполнено согласно выражениям (2).

$$trn(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } (x \leq a) \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } (a < x \leq b) \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } (b \leq x < c) \\ 0, & \text{if } (x \geq c) \end{cases} \quad (2)$$

ANFIS-сеть содержит по 3 треугольных терм-множества на каждый вход («L», «M» и «H») и 9 правил.

Адаптация реализуется через блок адаптации (БА), который динамически корректирует веса ANFIS-сети в режиме реального времени. В рамках настоящей работы корректировке подвергаются параметры «а» и «с» терм-множеств («L», «M», «H») для каждого входного сигнала и режима взлётно-посадочного цикла (ВПЦ), что позволяет учитывать изменяющиеся условия работы газотурбинного двигателя.

Дефаззификация выполняется по методу среднего взвешенного значения.

Адаптивный нейронно-нечеткий измеритель температуры снизил инерционность на 5-7%, уменьшил СКО на 89%.

В третьей главе рассматривается моделирование системы управления эмиссией оксидов азота. 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.

Для оценки предлагаемого подхода к построению системы управления КС предлагается следующая целевая функция (ЦФ) (3):

$$F = A \cdot \left(\sum_{i=1}^k \text{MNO}_x^{\text{переход.режим}} \right) + B \cdot \left(\sum_{i=1}^k \text{MNO}_x^{\text{уст.режим}} \right) + C \cdot \left(\sum_{i=1}^k n_{\text{crisis}} \right) = \min \leq F_{\text{доп.}} \quad (3)$$

Параметры целевой функции:

- k – количество режимов за полный взлетно-посадочный цикл;
- $\text{MNO}_x^{\text{переход.режим}}$ – нормированные значения $\in [0; 1]$ интеграла выбросов оксидов азота на переходных режимах;
- $\text{MNO}_x^{\text{уст.режим}}$ – нормированные значения $\in [0; 1]$ интеграла выбросов оксидов азота на установившихся режимах;
- n_{crisis} – нормированные количество неустойчивых состояний работы КС $\in [0; 1]$, максимальное количество срывов не превышает количество режимов работы системы.
- где коэффициенты A, B, C подчиняются нормировочному условию:

$$A+B+C=1.$$

По умолчанию в работе используются равные веса:

$$A=0,33, B=0,33, C=0,33.$$

Значения коэффициентов могут корректироваться на основе экспертных оценок с учетом специфики работы системы и приоритизации критериев управления.

Ограничения, накладываемые на целевую функцию:

1. Целевая функция должна обеспечивать соответствие международным стандартам ИКАО по интегральным значениям выбросов оксидов азота: $F_{\text{доп.}}=18$ кг за взлетно-посадочный цикл.

2. Технические характеристики камеры сгорания и устойчивость работы системы:

- Поддержание температурного режима в камере сгорания $T_{\text{КС}}$ в пределах технологически допустимого диапазона 1100-1700 К.
- Диапазон устойчивого горения по коэффициенту избытка воздуха $\alpha_{\text{КС}} \in [0.6; 1.8]$.
- Диапазон устойчивого горения зависит от стехиометрического коэффициента α_{T} и расхода топлива G_{TD} в диффузионном коллекторе.
- Вводятся ограничения с 10 % запасом по устойчивости принимают следующий вид:
 - если $\alpha_{\text{T}} \geq 6,3$ и $G_{\text{TD}} \leq 50\%$ (от суммарного топлива), то процесс в КС находится на границе с полным «бедным» срывом пламени;

- если $\alpha_r \geq 4,5$ и $G_{ID} < 50\%$, то процесс в КС находится на границе с частичным «бедным» срывом пламени;
- если $\alpha_r \leq 2,7$ и $G_{ID} \leq 5\%$, то граничное состояние «вибrogорение», без критических нарушений устойчивости.

Оптимальное решение должно удовлетворять всем установленным ограничениям и обеспечивать:

- оптимум за счет перераспределения топлива между коллекторами (диффузионным и гомогенным) для эффективного сгорания.
- устойчивость горения в камере сгорания, предотвращая «бедный» срыв и «вибrogорение».
- Поддержание заданной тяги двигателя $R_{тяг}$ на режимах ВПЦ.

На рисунке 5 представлены результаты эксперимента, проведённого в нормальных условиях.

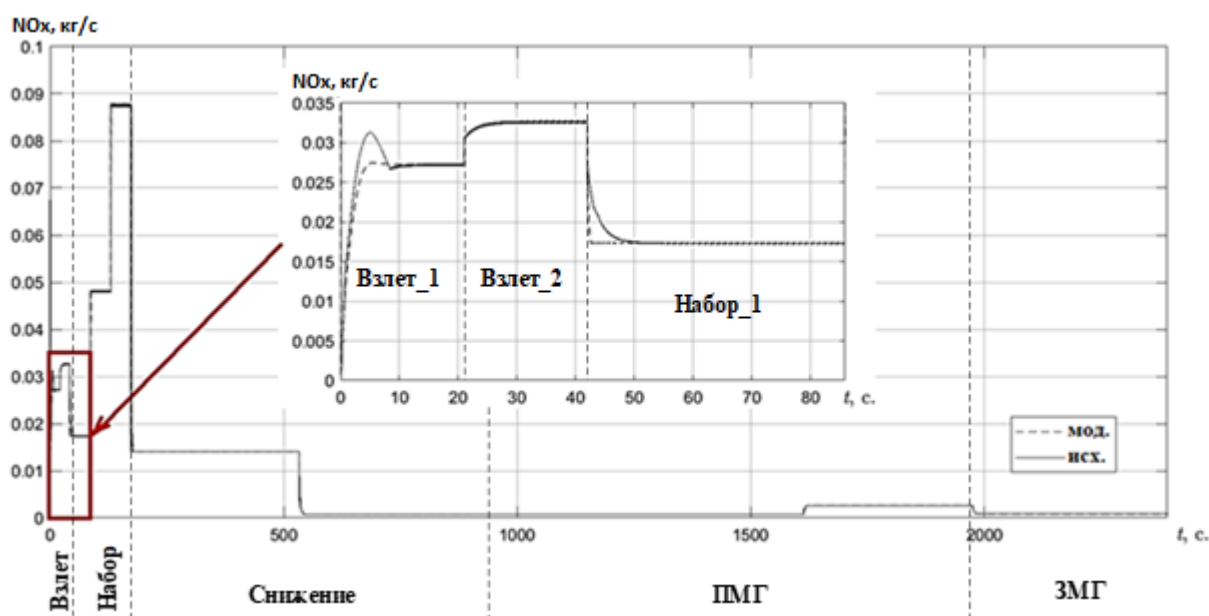


Рисунок 5 – Сравнение выбросов оксидов азота (NO_x) исходной (исх.) и модифицированной (мод.) САУ МЭКС выбросами оксидов азота в нормальных условиях

Наибольшее снижение выбросов NO_x достигается за счет модифицированной САУ в переходных режимах ГТД (8,49-15,23%), в установившихся – до 1,93%, с незначительным ухудшением в отдельных случаях.

На рисунке 6 продемонстрировано сравнение интегрального значения выбросов оксидов азота MNO_x исходной и модифицированной САУ в нормальных условиях.

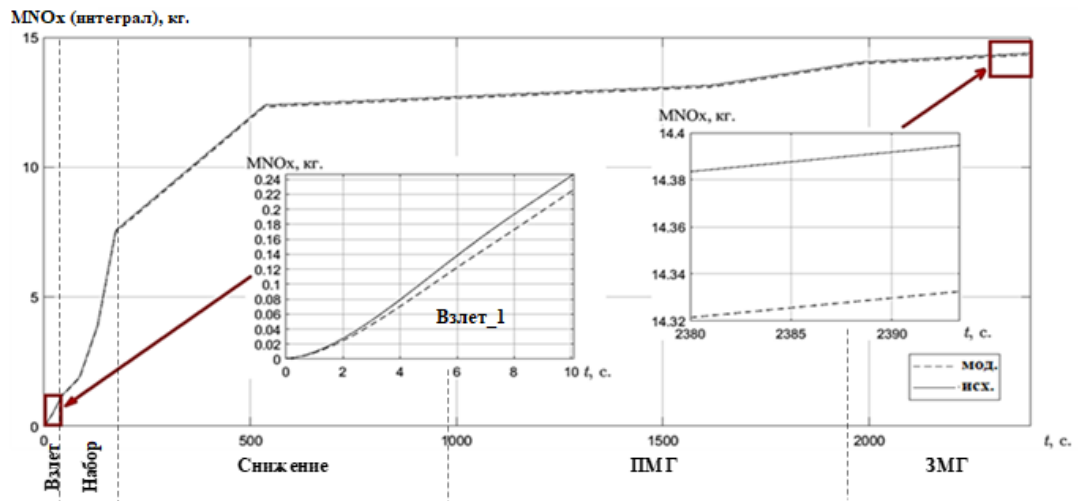


Рисунок 6 – Сравнение интегрального значения выбросов оксидов азота MNO_x исходной (исх.) и модифицированной (мод.) САУ выбросами оксидов азота в нормальных условиях

На интервале (рисунок 6) интегральное значение MNO_x снизилось с 14,39 кг (исходная САУ) до 14,33 кг (модифицированная), улучшение – 0,44%. Рисунки 7-8 показывают комплексный эксперимент с изменяющимися внешними факторами (температура, давление, помехи, деградация, отказ G_t), оценивая устойчивость и работоспособность ГТД в реальных условиях.

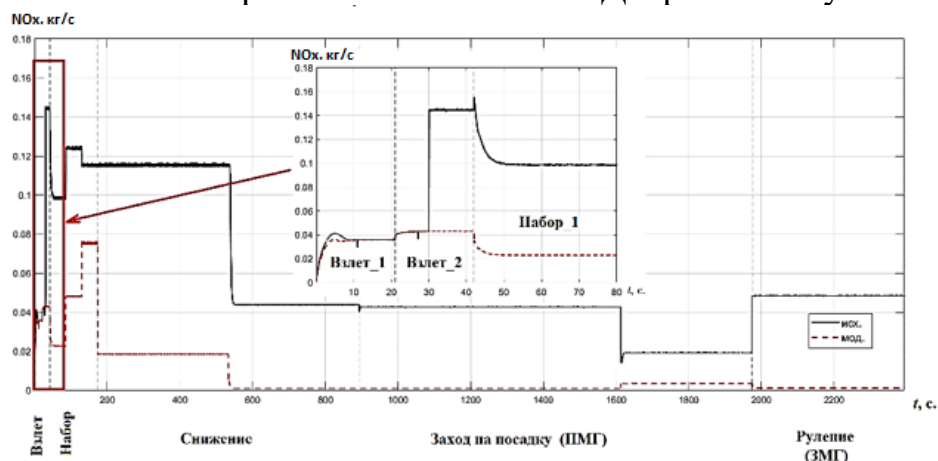


Рисунок 7 – Сравнение выбросов NO_x для исх. и мод. САУ МЭКС с учетом высокой температуры, низкого давления, помех, деградации и отказа G_t

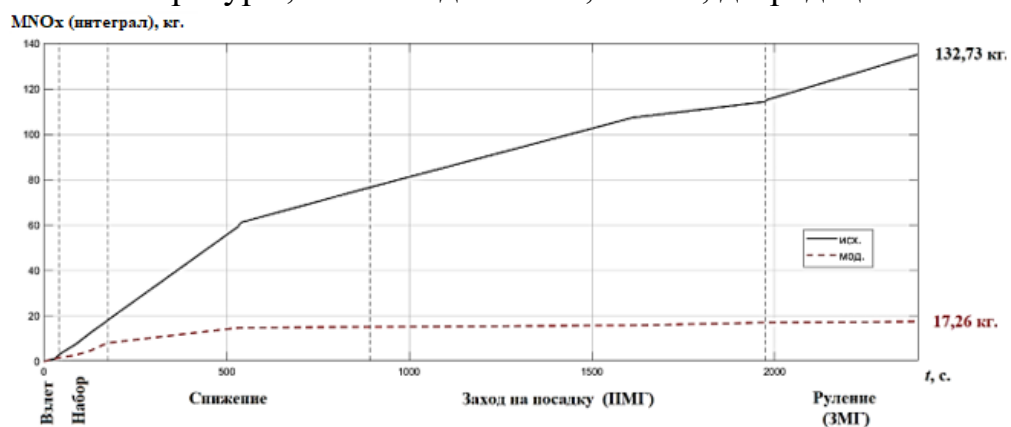


Рисунок 8 – Сравнение интеграла выбросов MNO_x для исх. и мод. САУ МЭКС с учетом высокой температуры, низкого давления, помех, деградации и отказа G_t

Модифицированная САУ значительно снижает выбросы NO_x в переходных режимах: «Взлет» – на 6,02% и 2,43%, «Набор» – до 68,35%. Снижение, заход на посадку, руление – ухудшение в исходной САУ на 76-98%. Суммарный выброс MNO_x за ВПЦ: 132,73 кг (исходная) → 17,26 кг (модифицированная), снижение на 86,9%.

Эксперимент проводился как в нормальных условиях, так и при воздействии флуктуационных и импульсных помех, деградации и отказов измерительных контуров. Полученные результаты сведены в таблицу 1, а также проведен комплексный эксперимент с учетом влияния всех перечисленных возмущающих факторов.

Таблица 1 – Сравнительная таблица результатов экспериментов по целевой функции в различных условиях

Условия		F исходной САУ	F модифицированной САУ	Преимущество модифицированной САУ
Нормальные условия	Нормальные	0,66	0,6383	3,29%
	Фл. помехи	0,66	0,6392	3,15%
	Имп. помехи	0,66	0,6383	3,31%
	Деградация	0,66	0,6389	3,19%
	Отказ контура измерения	1	0,1	90%
Комплексный эксперимент в изменяющихся внешних условиях при помехах, деградации и отказе		1	0,09	91%

Модифицированная САУ превосходит исходную по целевой функции в среднем на 3,3% в нормальных условиях и на 91% в изменяющихся условиях (при помехах, деградации и отказе контура G_t) (таблица 1).

В четвертой главе представлена апробация САУ выбросами NO_x на сертификационном стенде ГТД повышенной тяги, с системой FADEC, разрабатываемой в России для ПД-14, ПД-35 и других двигателей. Разработанные решения успешно внедрены на АО «ОДК-СТАР» (г. Пермь), подтвердив их работоспособность и корректность.

Стенд оснащен РЭД на программируемом контроллере NI CompactRIO, обеспечивающий автоматическое управление двигателем, на различных режимах ВПЦ.

На рисунке 9 представлен полунатурный экспериментальный стенд для проведения эксперимента с интегрированными исходной и модифицированной САУ управления оксидами азота. Это позволило обеспечить взаимодействие программного алгоритма с реальной аппаратной частью системы управления.

Эксперимент проводился как в нормальных условиях, так и при воздействии флуктуационных и импульсных помех, деградации и отказов измерительных контуров. Полученные результаты сведены в таблицу 2, а также проведен комплексный эксперимент с учетом влияния всех перечисленных возмущающих факторов.

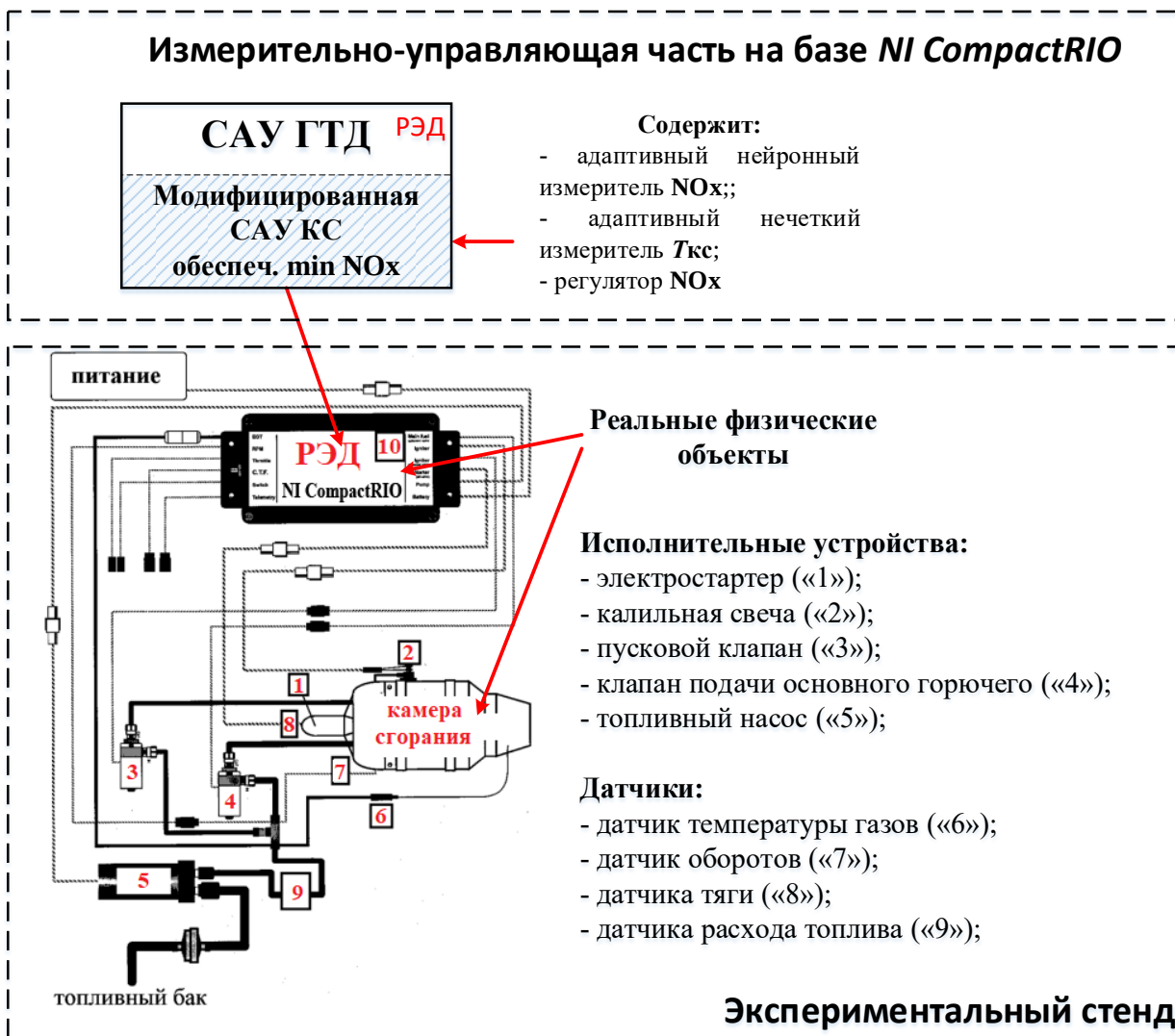


Рисунок 9 – Схема экспериментального полунатурного стенда перспективного ГТД повышенной тяги

Рисунки 10-11 иллюстрируют комплексный эксперимент в изменяющихся внешних условиях, включая температуру, давление, помехи и деградацию контура G_t .

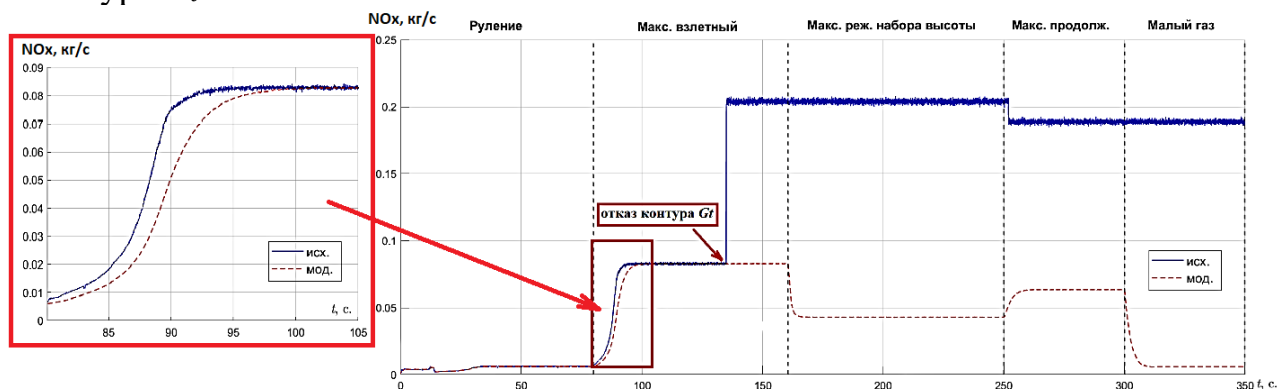


Рисунок 10 – Сравнение выбросов NO_x для исх. и мод. САУ МЭКС с учетом высокой температуры, низкого давления, помех, деградации и отказа G_t

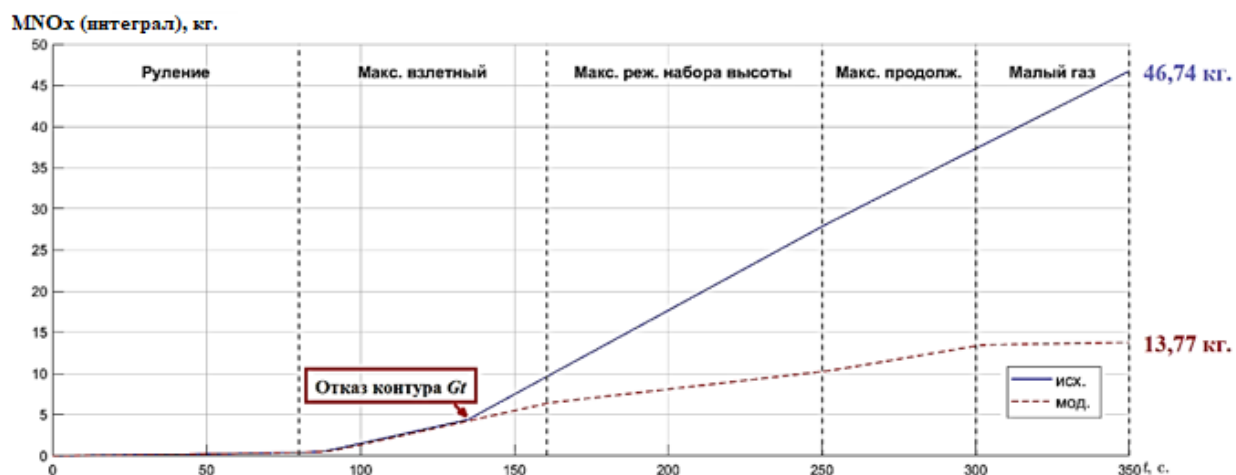


Рисунок 11 – Сравнение интеграла выбросов MNO_x для исх. и мод. САУ с учетом высокой температуры, низкого давления, помех, деградации и отказа G_t

Результаты комплексного эксперимента:

Модифицированная САУ в переходных режимах снижает выбросы NO_x в среднем на 28%:

- «Малый газ» – снижение на 93,98%
- «Максимальный продолжительный» – снижение на 68,87%
- «Максимальный режим набора высоты» – снижение на 77,73%
- «Максимальный взлетный» – снижение на 10,21%
- «Руление» – снижение минимальное (1,22%)

Суммарный выброс MNO_x : 46,74 кг (исходная) и 13,77 кг (модифицированная), улучшение на 70,5%.

Таблица 2 – Сравнительная таблица результатов экспериментов по целевой функции в различных условиях

Условия		F исходной САУ	F модифицированной САУ	Преимущество модифицированной САУ
Нормальные условия	Нормальные	0,66	0,6300	4,55%
	Фл. помехи	0,66	0,6297	4,59%
	Имп. помехи	0,66	0,6299	4,56%
	Деградация	0,66	0,6360	3,63%
	Отказ контура измерения	1	0,20	80%
Комплексный эксперимент в изменяющихся внешних условиях при помехах, деградации и отказе		1	0,19	81%

Модифицированная САУ превосходит исходную по целевой функции на 4,55% в нормальных условиях и на 81% в изменяющихся условиях (при помехах, деградации и отказе контура G_t) (таблица 2).

Результаты моделирования свидетельствует о том, что модифицированная САУ эмиссией оксидов азота точнее учитывает реальные условия, в отличие от

исходной, которая, работая в аварийном режиме, искажала результаты и некорректно оценивала выбросы NO_x .

В заключении сформулированы основные результаты проведенных теоретических и экспериментальных диссертационных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведён анализ учёта и управления выбросами NO_x :

- изучены механизмы образования NO_x в камере сгорания, способы контроля (конструктивные решения, впрыск воды, типы форсунок) и ограничения классических датчиков в реальном времени;
- выделена необходимость разработки нейросетевой системы управления выбросами эмиссии с применением виртуальных измерителей и интеллектуальных алгоритмов.

2. Разработан метод управления концентрацией эмиссии оксидов азота:

- метод ориентирован на предотвращение «виброгорения» и «бедного срыва» в малоэмиссионных камерах сгорания, учитывая влияния внешней среды (температура, давление) и различные помехи;
- предусматривается корректировка топлива по коллекторам для минимизации NO_x без выхода за границы устойчивости горения.

3. Предложен способ построения и структуры виртуальных измерителей:

- используются нейросети (ANFIS и перцептрон) для определения концентрации NO_x и температуры без физических датчиков внутри камеры;
- структуры имеют механизмы адаптации к разным режимам ГТД (взлёт, малый газ и т.д.), обеспечивая высокую точность оценок и умеренную вычислительную нагрузку.

4. Разработан способ коррекции расхода топлива в коллекторах с учетом переходных режимов и устойчивой работы камеры сгорания за счет применения регулятора концентрации эмиссии оксидов азота в системе автоматического управления ГТД.

5. Выполнено внедрение разработанной САУ малоэмиссионной камеры сгорания ГТД на АО «ОДК-СТАР» и в образовательных практикумах ПНИПУ:

На стенде перспективного ГТД снижение выбросов NO_x достигло в среднем 2,8 % в переходных режимах (при нормальных условиях) и 70,54% (при изменяющихся). Интеграл эмиссии MNO_x согласно целевой функции уменьшен на 4,55% (при нормальных условиях) и 81% (при изменяющихся).

Перспективы включают дальнейшую оптимизацию и применение глубоких нейронных сетей для удовлетворения новых экологических требований.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе
индексированных в международной базе цитирования Scopus**

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.

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.

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.

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.

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.

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.

7. Нейро-нечеткое 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.

Публикации в изданиях, индексируемые в международной базе цитирования Scopus

8. Fuzzy Adaptive Control of a Stochastic Non-deterministic Object / **V.S. Nikulin**, Y.N. Khizhnyakov, A.A. Yuzhakov, S.A. Storozhev // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 25–28 января 2022 года. – St. Petersburg, 2022. – P. 675-679. – DOI 10.1109/ElConRus54750.2022.9755594.

9. **Nikulin, V.S.** Gas Turbine Engine Combustion Chamber Pollutant Meter Using Neural Technology / **V.S. Nikulin**, Y.N. Khizhnyakov, S.A. Storozhev // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 934-936. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396475.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617356 Российская Федерация. Динамическая модель системы управления эмиссии оксидов азота : № 2022616904 : заявл. 20.04.2022: опубл. 20.04.2022 / **В.С. Никулин**, А.А. Южаков, Ю.Н. Хижняков, С.А. Сторожев; заявитель

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Прочие публикации

11. Методы адаптации нечетких систем управления / **В.С. Никулин**, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков, С.А. Сторожев // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : сборник статей по материалам Восьмой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 25–26 октября 2022 года. – Пермь: ПНИПУ, 2022. – С. 586-591.

12. Нечеткий регулятор состояний / **В.С. Никулин**, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков, С.А. Сторожев // Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: Сборник статей по материалам Международной конференции и Шестой всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 12–18 октября 2020 года / Под редакцией Л.Н. Ясницкого. – Пермь: ПНИПУ, 2020. – С. 240-246.

13. Методы и инструменты создания интеллектуальных систем управления / **В.С. Никулин**, Ю.Н. Хижняков, С.А. Сторожев, В.Д. Загвозкин // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : сборник статей по материалам Седьмой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 21–22 октября 2021 года. – Пермь: ПНИПУ, 2021. – С. 407-412.

14. Адаптивное двухстороннее мультиагентное управление газотурбинного двигателя / **В.С. Никулин**, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков, С.А. Сторожев // Интеллектуальные системы в науке и технике. Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : Сборник статей по материалам Международной конференции и Шестой всероссийской научно-практической конференции, Пермь, 12–18 октября 2020 года / Под редакцией Л.Н. Ясницкого. – Пермь: ПНИПУ, 2020. – С. 233-240.

15. **Никулин, В.С.** Исследование нейро-релейно-импульсного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора с алгоритмом адаптации для объектов с эталонной моделью / В.С. Никулин, Е.И. Ефимова, С.А. Сторожев // Автоматизированные системы управления и Информационные технологии : Материалы всероссийской научно-технической конференции. В двух томах, Пермь, 09–11 июня 2020 года. Том 1. – Пермь: ПНИПУ, 2020. – С. 4-11.