

Грибков Игорь Николаевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДОГРЕВА И НАДДУВА ВОЗДУХА
НА ВХОДЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЕГО ИСПЫТАНИЙ
ДЛЯ ИМИТАЦИИ РАБОТЫ КОНТУРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВУХКОНТУРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Работа выполнена в акционерном обществе «ОДК-Авиадвигатель».

Научный руководитель: ИНОЗЕМЦЕВ Александр Александрович,
академик РАН, д-р техн. наук, профессор

Официальные оппоненты: АРБЕКОВ Александр Николаевич,
д-р техн. наук, доцент, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», кафедра газотурбинных двигателей
и комбинированных установок, профессор
ГРИГОРЬЕВ Владимир Алексеевич,
д-р техн. наук, профессор, федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Самарский
национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева», кафедра теории
двигателей летательных аппаратов имени
В.П. Лукачева, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
г. Москва

Защита состоится «1» марта 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.18 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «10» января 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор

М.Ш. Нихамкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Газогенератор определяет основные технические параметры и эксплуатационные характеристики современного турбореактивного двухконтурного двигателя и представляет собой контур высокого давления, состоящий из компрессора, камеры сгорания и турбины. Газогенератор работает при максимальных значениях температур, давлений и скоростей потока в проточной части двигателя, поэтому содержит наибольшую долю передовых и дорогостоящих технологий и материалов.

Высокая сложность рабочих процессов газогенератора не позволяет при выборе проектных решений руководствоваться только априорными представлениями, теоретическими предположениями и результатами математического моделирования. Подтверждение правильности выбранных технических решений невозможно без проведения необходимого объема испытаний в условиях максимально приближенных к эксплуатационным. Значительную роль в этом играют испытания с имитацией условий эксплуатации, позволяющие воспроизвести работу контура низкого давления, проектируемого полноразмерного турбореактивного двухконтурного двигателя.

Подобные испытания, которые традиционно проводятся в крупных научно-исследовательских центрах, не позволяют с минимальными материальными и временными затратами сформировать необходимый научно-технический задел. Прежде всего это связано с высокой стоимостью их подготовки и проведения из-за значительной сложности и энергоемкости технологических процессов, а также большими логистическими издержками. Поэтому значительное увеличение доли научно-исследовательских работ, особенно на начальных этапах создания газогенератора требует организации испытаний с подогревом и наддувом воздуха на его входе непосредственно в условиях моторостроительного предприятия. Вместе с этим необходимо отметить, что такие испытания газогенератора в условиях моторостроительного предприятия представляют собой технологически трудоемкие процессы, которые зачастую характеризуются низкой степенью автоматизации и высокой долей ручного труда. Например, воспроизведение требуемых рабочих параметров воздуха на входе газогенератора в настоящее время осуществляют за счет многоэтапного совместного изменения режима работы технологического оборудования и положения регулируемых воздушных заслонок, что дополнительно сопряжено с высокой вероятностью возникновения аварийных режимов. Таким образом, обеспечение подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора для имитации работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя с минимальными техническими и финансовыми рисками в современных условиях невозможно без автоматизации и представляет собой сложную и актуальную задачу.

Степень разработанности темы исследования. Формированию основных методов и способов испытаний газотурбинных двигателей и газогенераторов с имитацией условий эксплуатации, посвящены работы В.М. Акимова, В.И. Бабкина, Г.М. Горбунова, В.А. Григорьева, А.А. Иноземцева, Б.М. Клинского, Н.Д. Кузнецова, В.Я. Левина, В.Н. Леонтьева, Е.Ю. Марчукова, Ю.И. Павлова,

Л.С. Скубачевского, В.А. Скибина, Э.Л. Солохина, А.А. Шишкова и др. Проблемы автоматизации таких испытаний рассмотрены в работах В.Г. Августиновича, Р.И. Адгамова, Д.А. Ахмедзянова, М.М. Берхеева, С.Н. Васильева, Ф.Д. Гольберга, О.С. Гуревича, А.А. Шевякова, Г.П. Шибанова и др. Существенный вклад в создание и развитие испытательных комплексов и установок внесли коллективы Национального газотурбинного института (Англия), НИЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова (Россия), НИЦ им. Льюиса (США), НИЦ им. Ленгли (США), НИЦ им. Арнольда (США), ОДК-Авиадвигатель (Россия), ОДК-Кузнецов (Россия), ОДК-Сатурн (Россия), университета Штутгарта (Германия) и др. Вместе с тем, вопросы проведения испытаний с подогревом и наддувом воздуха на входе газогенератора на начальных этапах создания и, в частности, вопросы автоматизации таких испытаний, получили недостаточное освещение в специализированной литературе. Например, такие теоретические и прикладные задачи, как математическое и алгоритмическое обеспечение технологического процесса испытаний газогенератора разработаны менее детально. Решению этих и некоторых других задач посвящена представленная диссертация.

Цель исследования заключается в сокращении материальных и временных затрат при создании современного турбореактивного двухконтурного двигателя за счет автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора при проведении его испытаний для имитации работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя в условиях моторостроительного предприятия.

Задачи исследования заключаются в следующем:

1. Рассмотреть основные способы испытаний газогенератора современного турбореактивного двухконтурного двигателя с имитацией эксплуатационных условий, а также особенности автоматизации испытаний.

2. Разработать комплексную математическую модель технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора и выполнить оценку модели на установившихся и неустойчивых режимах работы.

3. Разработать алгоритмы автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора и выполнить расчетно-экспериментальное исследование алгоритмов в условиях специально созданной установки для полунатурного моделирования.

4. Выполнить апробацию алгоритмов автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора в условиях испытательного стенда моторостроительного предприятия.

Объект исследования представляет собой технологический процесс подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора при проведении его испытаний для воспроизведения параметров газового потока на выходе компрессора низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя.

Предмет исследования представляет собой математические модели и алгоритмы автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора для натурного моделирования работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые разработана комплексная многопараметрическая математическая модель технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя, отличающаяся комплексным описанием совместной работы газогенератора, технологического двигателя и воздуховода, учитывающее газодинамическое взаимовлияние, что позволяет исследовать особенности технологического процесса на установившихся и неустановившихся режимах работы.

2. Впервые разработаны оригинальные алгоритмы автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя с использованием теории нечеткой логики, отличающиеся комплексным управлением газогенератора, технологического двигателя и воздуховода на основе эталонных математических моделей в режиме реального времени, что позволяет минимизировать количество управляющих воздействий, сократить длительность и трудоемкость испытаний.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в сокращении длительности и трудоемкости испытаний газогенератора путем использования созданных моделей и алгоритмов для автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора в условиях моторостроительного предприятия с минимальными техническими и финансовыми рисками. Оригинальность созданных моделей и алгоритмов подтверждена полученными патентами и свидетельствами. Для обеспечения эффективности исследований была создана высокопроизводительная установка для полунатурного моделирования технологического процесса.

Результаты диссертации нашли практическое применение при создании впервые в отрасли малогабаритной системы имитации параметров полноразмерного двигателя на входе испытуемого газогенератора от одного технологического двигателя для проведения научно-исследовательских испытаний газогенераторов семейства перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей ПД в ОДК-Авиадвигатель. Это позволило при минимальных финансовых и временных затратах по сравнению с другими вариантами испытаний, обеспечить наибольшую оперативность и гибкость проведения доводочных и исследовательских испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14.

Методология и методы исследования основаны на применении теории газотурбинных двигателей, автоматического управления, нечеткой логики, методов аналитического, численного и полунатурного моделирования и др.

Основные положения исследования, выносимые на защиту, включают:

1. Математическая модель технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя (п. 13, 23, 25 паспорта специальности).

2. Алгоритмы автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя (п. 10, 22 паспорта специальности).

3. Установка полунатурного моделирования для экспериментального исследования алгоритмов автоматизации технологического процесса подогрева и

наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя (п. 10, 22 паспорта специальности).

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается применением фундаментальных физических законов механики и термодинамики, непротиворечивостью и высокой воспроизводимостью теоретических результатов, а также хорошим совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными с использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования.

Личный вклад. Автор сформулировал цель, задачи и обосновал выбор методов исследования, самостоятельно разрабатывал соответствующие математические модели и проводил разработку и исследования алгоритмов автоматизации. Основные результаты получены, обработаны и интерпретированы автором лично.

Апробация результатов исследования проводилась на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах, среди которых: Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2014, 2020, 2021), Международный научно-технический конгресс по двигателестроению (г. Москва, 2014), Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» (г. Москва, 2015), Международная Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (г. Москва, 2015), Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям (г. Москва, 2021), II Международная конференция «Математическое моделирование» (г. Москва, 2021), Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2021).

Доклады и выступления отмечены дипломами и почетными грамотами, среди которых почетная грамота за первое место на Международной Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (г. Москва, 2015), диплом второй степени на Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2020).

Публикации. Основные положения исследования опубликованы в 24 работах. В их числе 3 в научных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, 7 в научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 4 патента на изобретение и 1 свидетельство регистрации программы ЭВМ. Остальные 9 работ опубликованы в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, а также приложения. При этом диссертация содержит 132 страницы, 44 рисунка, 6 таблиц и 3 приложения, а также список литературы содержит 137 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель, задачи, методы, научная новизна, а также показана практическая значимость исследования.

Первая глава носит обзорный характер, где оценивается роль испытаний с имитацией эксплуатационных условий при создании газогенератора современного турбореактивного двухконтурного двигателя. Рассматриваются основные способы испытаний с имитацией эксплуатационных условий, а также определяются особенности автоматизации испытаний.

Испытания с имитацией эксплуатационных условий имеют значительную роль при создании газогенератора современного турбореактивного двухконтурного двигателя. Такие испытания имитируют работу контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя, что обеспечивает возможность опережающего изучения и анализа процессов, определение характеристик, а также возможные средства их улучшения на этапе создания двигателя. Это позволяет уменьшить технические и финансовые риски создания газогенератора и двигателя.

Основные способы испытаний с имитацией эксплуатационных условий в зависимости от полноты воспроизведения параметров воздуха на входе в объект испытания можно разделить на испытания с полной и с частичной имитацией эксплуатационных условий. Определено, что испытания с полной имитацией эксплуатационных условий позволяют выполнить полный объем научно-исследовательских и сертификационных испытаний. Однако, такие испытания имеют сложные системы, дорогостоящее оборудование, требуют больших площадей, а их строительство и эксплуатация связаны со значительными капитальными затратами. В свою очередь, испытания с частичной имитацией эксплуатационных условий позволяют выполнить минимальный объем научно-исследовательских испытаний. При этом такие испытания не требуют проектирования и изготовления уникальных агрегатов и громоздких вспомогательных технологических систем, что позволяет существенно увеличить долю научно-исследовательских испытаний на начальных этапах создания в условиях моторостроительного предприятия.

Испытания газогенератора современного турбореактивного двухконтурного двигателя с имитацией эксплуатационных условий позволяют увеличить долю научно-исследовательских испытаний на начальных этапах его создания. Одним из действенных решений является проведение испытаний с подогревом и наддувом воздуха на входе газогенератора для имитации работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя непосредственно в условиях моторостроительного предприятия. Например, оригинальный технологический процесс испытаний с подогревом и наддувом воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14 в условиях моторостроительного предприятия ОДК-Авиадвигатель. Принципиальная схема процесса испытаний с подогревом и наддувом воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя, представлена на Рисунке 1.

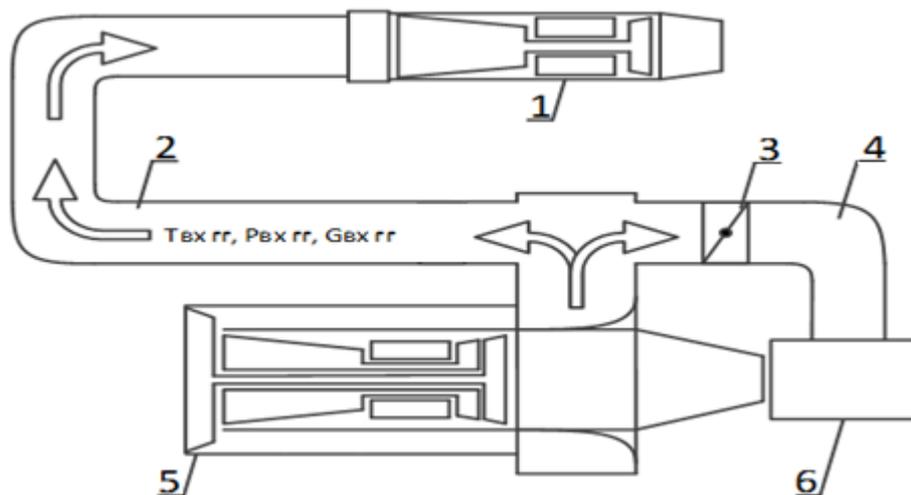


Рисунок 1 – Принципиальная схема технологического процесса испытаний с подогревом и наддувом воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя.

Основным способом подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора (1) является совместное изменение режима работы технологического двигателя (5) и положения заслонки перепуска воздуха (3) в стендовую систему выхлопа (6) с учетом особенностей, обусловленных значительными линейными размерами воздухопроводов испытательного комплекса (2) и (4). При этом отмечено, что процесс подогрева и наддува воздуха носит многоэтапный характер и в большинстве случаев характеризуется низким уровнем автоматизации, что приводит к значительному увеличению продолжительности настройки различных испытательных режимов работы газогенератора, а в некоторых случаях является причиной аварийных режимов всего технологического процесса испытаний.

Определено, что сложность автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора связана с тем, что при формировании и выборе проектных решений необходимо учитывать такие особенности процесса, как многомерность, многосвязность, нелинейность, а также априорную и апостериорную неопределенность, что проявляется при совместной работе технологического двигателя и испытуемого газогенератора. Отмечено, что вопросы, связанные с математическим и алгоритмическим обеспечением технологического процесса подогрева и наддува воздуха, требуют дополнительной теоретической и практической проработки, так как вопросы системной автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора пока не нашли промышленного освоения.

Вторая глава посвящена разработке математической модели технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя, а также программной реализации и оценке достоверности разработанной математической модели.

Определено, что помимо основных свойств характерных для математических моделей, таких как точность и адекватность результатов моделирования, рассматриваемая модель технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора должна обладать дополнительными свойствами, важнейшими

из которых являются динамичность, масштабируемость и производительность. Такие свойства позволят использовать математическую модель для комплексного исследования особенностей технологического процесса испытаний, а также для последующего экспериментального исследования алгоритмов автоматизации.

Сформирована структура комплексной многопараметрической математической модели, включающая в себя подсистемы «Технологический двигатель», «Воздуховод с заслонкой» и «Газогенератор» и учитывающая их газодинамическое взаимовлияние, что позволяет выполнить как полную, так и фрагментарную оценку взаимодействия газогенератора, технологического двигателя и воздуховода. При этом основу предложенной структуры составляет базовый элемент, который может быть представлен, некоторым физическим объемом для которого определен вход и выход потока рабочего тела в расчетных сечениях, а связь между параметрами на входе и выходе описывается уравнениями сохранения массы и энергии, а в случае наличия механической энергии дополняется уравнением движения. Структура математической модели показана на Рисунке 2.

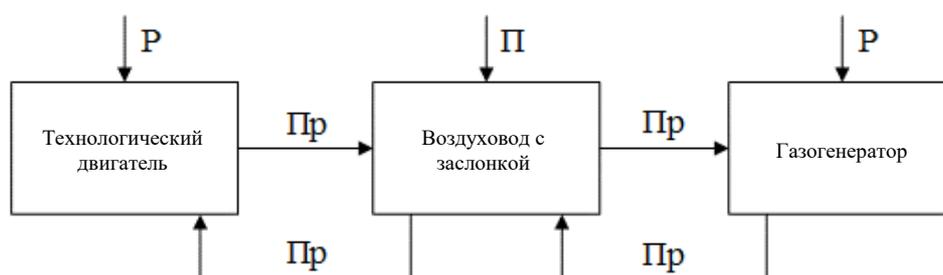


Рисунок 2 – Структура математической модели технологического процесса:
P – сигнал управления «Режим работы»; П – сигнал управления «Перепуск воздуха»; Pr – термодинамические параметры потока воздуха.

Математическое описание модели технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя представлено в виде системы из более чем ста нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, а также нелинейных алгебраических уравнений и зависимостей, где в основе описания отдельных расчетных блоков лежат наработки коллективов ЦИАМ им. П.И. Баранова, ОДК-Авиадвигатель и др. Математическое описание учитывает такие динамические факторы, как инерция вращающихся масс роторов, сжимаемость газов в емкостях, зависимость адиабатического коэффициента полезного действия компрессора от его частоты вращения и степени сжатия воздуха, зависимость полноты сгорания топлива в камере сгорания от коэффициента избытка воздуха и др. Например, математическое описание воздуховода может быть представлено пневматической емкостью, заполненной воздухом, который движется под действием перепада давлений, создаваемого работой испытуемого газогенератора и технологического двигателя, а также зависит от положения регулирующей заслонки. Принято, что параметры воздуха постоянны в пространстве, но при этом переменны во времени, на основании того, что время изменения параметров воздуха на отдельных участках воздуховода более чем на два

порядка больше времени распространения возмущения параметров по всему воздуховоду.

$$\frac{dp_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{\chi R}{V} (G_{\text{к нд тд}} T_{\text{к нд тд}} - G_{\text{к вд гг}} T_{\text{ВЫХ}} - G_{\text{засл}} T_{\text{ВЫХ}}), \quad (1)$$

$$\frac{dT_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{RT_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВЫХ}} V} [G_{\text{к нд тд}} (\chi T_{\text{к нд тд}} - T_{\text{ВЫХ}}) + (G_{\text{к вд гг}} + G_{\text{засл}})(1 - \chi) T_{\text{ВЫХ}}], \quad (2)$$

где $p_{\text{ВЫХ}}$ – давление воздуха на выходе подсистемы «воздуховод»; $T_{\text{ВЫХ}}$ – температура воздуха на выходе подсистемы «воздуховод»; V – объем подсистемы «воздуховод»; $T_{\text{к нд тд}}$ – температура воздуха на выходе подсистемы «технологический двигатель»; $G_{\text{к нд тд}}$ – расход воздуха на выходе подсистемы «технологический двигатель»; $G_{\text{к вд гг}}$ – расход воздуха на входе подсистемы «газогенератор»; $G_{\text{засл}}$ – расход воздуха через регулируемую заслонку; R – газовая постоянная; χ – показатель адиабаты.

Предложенное математическое описание не позволяет воспроизвести свойства технологического двигателя и газогенератора за границей их устойчивой работы, а точность результатов моделирования в большей степени определяется точностью заданных характеристик. При этом такое описание позволяет оценить особенности совместной работы газогенератора и технологического двигателя, обусловленные наличием существенных газодинамических связей между компрессорами газогенератора и технологического двигателя.

Выполнена программная реализация математической модели с использованием программного обеспечения типа MATLAB Simulink. Проведено динамическое моделирование технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора, в том числе возможных нештатных ситуаций с использованием ПЭВМ с тактовой частотой ЦП 2,3 ГГц, разрядностью ЦП 64 бита, а также объемом ОЗУ 4 Гб. Графики динамического моделирования представлены на Рисунке 3, где сплошной линией показаны результаты моделирования, а пунктирной линией показаны результаты эксперимента.

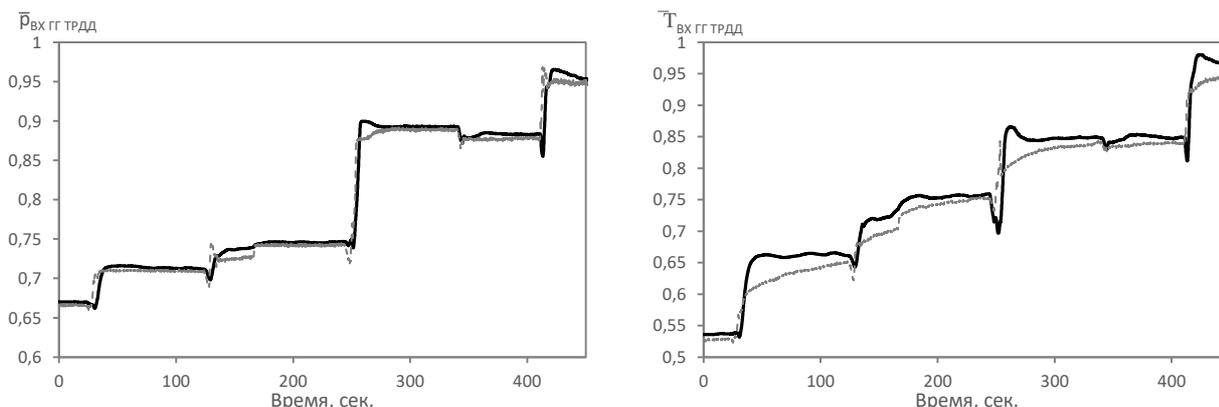


Рисунок 3 – Графики изменения давления и температуры воздуха на входе газогенератора.

Оценка достоверности математической модели выполнена сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными специализированного испытательного комплекса для научно-исследовательских испытаний газогенераторов семейства перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей ПД в ОДК-Авиадвигатель, где максимальная ошибка на установившихся режимах работы для $\bar{n}_{\text{к вд гг}}$, $\bar{n}_{\text{к нд тд}}$, $\bar{n}_{\text{к вд тд}}$, $\bar{p}_{\text{вх гг}}$, $\bar{p}_{\text{к вд гг}}$, $\bar{p}_{\text{к нд тд}}$ не превышает 3%,

а максимальная ошибка на неустановившихся режимах работы не превышает 7%. При этом максимальная ошибка для $\bar{T}_{\text{вх гг}}$, $\bar{T}_{\text{т вд гг}}$, $\bar{T}_{\text{к нд тд}}$ составляет 11÷15%, что связано в большей степени с отсутствием математической модели измерительной системы испытательного комплекса. Результаты моделирования показали высокую сходимость с экспериментальными данными, что позволяет использовать разработанную математическую модель для последующего экспериментального исследования алгоритмов автоматизации.

Третья глава посвящена вопросам разработки алгоритмов автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора для имитации работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя и рассмотрению способов их реализации, а также предлагается оригинальный способ экспериментального исследования алгоритмов автоматизации и приводятся основные результаты экспериментального исследования.

Определенно, на основании ранее разработанной математической модели и натуральных экспериментов, что основным способом имитации температуры воздуха на входе газогенератора является изменение режима работы технологического двигателя, а основным способом имитации давления воздуха на входе газогенератора является изменение перепуска воздуха из воздуховода в атмосферу.

Разработаны оригинальные алгоритмы автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора для имитации работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя. Оригинальность алгоритмов подтверждается полученным патентом (2797897 С1). Отличительной особенностью алгоритмов является использование эталонных математических моделей элементов рассматриваемого технологического процесса испытаний с минимальным количеством управляющих воздействий. При этом входными параметрами являются температура и давление воздуха на входе создаваемого турбореактивного двухконтурного двигателя и параметры технологического двигателя, характеризующие его газодинамическую устойчивость, а выходными параметрами являются только режим работы технологического двигателя и положение заслонки. Функциональная схема алгоритмов автоматизации показана на Рисунке 4.

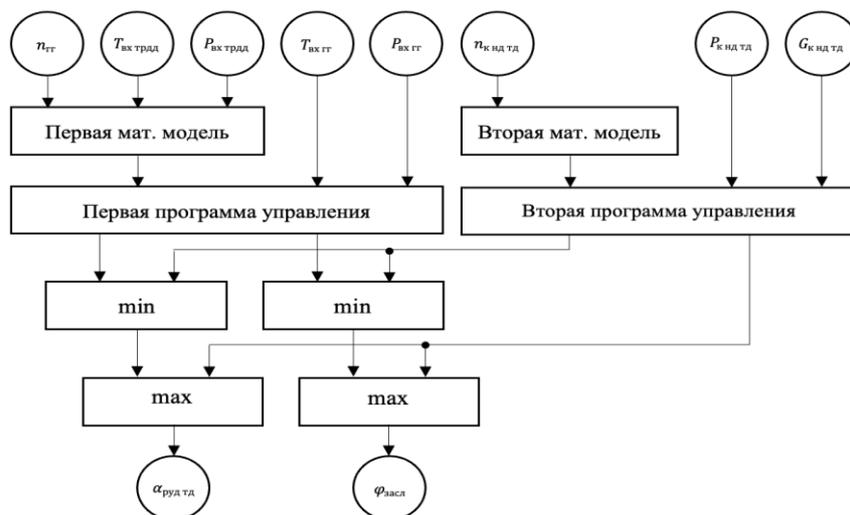


Рисунок 4 – Функциональная схема алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора.

Принцип работы предлагаемых алгоритмов заключается в последовательном увеличении режима работы газогенератора, где на каждой точке его дроссельной характеристики воспроизводится режим работы компрессора низкого давления, создаваемого турбореактивного двухконтурного двигателя. Требуемые значения температуры ($T_{\text{вх гг уст}}$) и давления ($p_{\text{вх гг уст}}$) воздуха на входе в испытываемый газогенератор, определяются с использованием первой термогазодинамической математической модели (эталонная математическая модель создаваемого турбореактивного двухконтурного двигателя) по значению измеренной частоты вращения ротора, испытываемого газогенератора ($n_{\text{гг}}$), и по наперед заданным (проектным) значениям температуры ($T_{\text{вх трдд}}$) и давления ($p_{\text{вх трдд}}$) воздуха на входе в создаваемый турбореактивный двухконтурный двигатель. Определение давления воздуха на выходе контура низкого давления технологического двигателя, соответствующее максимальной (помпажной) границе ($p_{\text{макс тд}}$) и давление воздуха на выходе контура низкого давления технологического двигателя, соответствующее минимальной (флатерной) границе ($p_{\text{мин тд}}$), определяют с использованием второй термогазодинамической математической модели (эталонная математическая модель технологического двигателя) по измеренной частоте вращения ротора компрессора низкого давления технологического двигателя ($n_{\text{тд}}$). В свою очередь, формирование режима работы технологического двигателя и положения заслонки выхлопа выполняется на основании расчетов по первой и второй программам управления с учетом фактического газодинамического состояния технологического двигателя.

Предложена реализация алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора на основе теории нечеткой логики с учетом многомерности, нелинейности, а также априорной и апостериорной неопределенности технологического процесса испытаний. Сформирована оригинальная совокупность правил нечеткого управления, которая содержит более двадцати правил типа: «IF (*Dlt_T is Req_Increase_T*) AND (*Dlt_T is Control_T*) AND (*Dlt_OP is not Req_Decrease_OP*) THEN *RUD is RUD_QF*», учитывающих конструктивные особенности оборудования рассматриваемого технологического процесса. При этом учитывая, что рассматриваемый технологический процесс характеризуется существенной многомерностью, многосвязностью, нелинейностью, неопределенностью и является малоизученным, предлагается формирование правил нечеткого управления выполнять на основе экспертного опыта, уточненного по результатам математического моделирования. Определены виды термов фаззификации и дефаззификации, которые в большинстве случаев представляют собой прямоугольные или трапециевидные формы, что обусловлено дискретным характером управляющих воздействий. Программная реализация предложенного решения выполнена с использованием программного обеспечения типа MATLAB и LabVIEW, а общий объем программного обеспечения составляет не более 1 400 Кб.

Выполнено численное исследование алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя в условиях оригинальной высокопроизводительной установки полунатурного моделирования для снижения технических и финансовых рисков экспериментального исследования алгоритмов в условиях

моторостроительного предприятия. Оригинальность установки подтверждается полученными патентами (2789850 С1, 187791 U1). Функциональная схема установки полунатурного моделирования представлена на Рисунке 5.

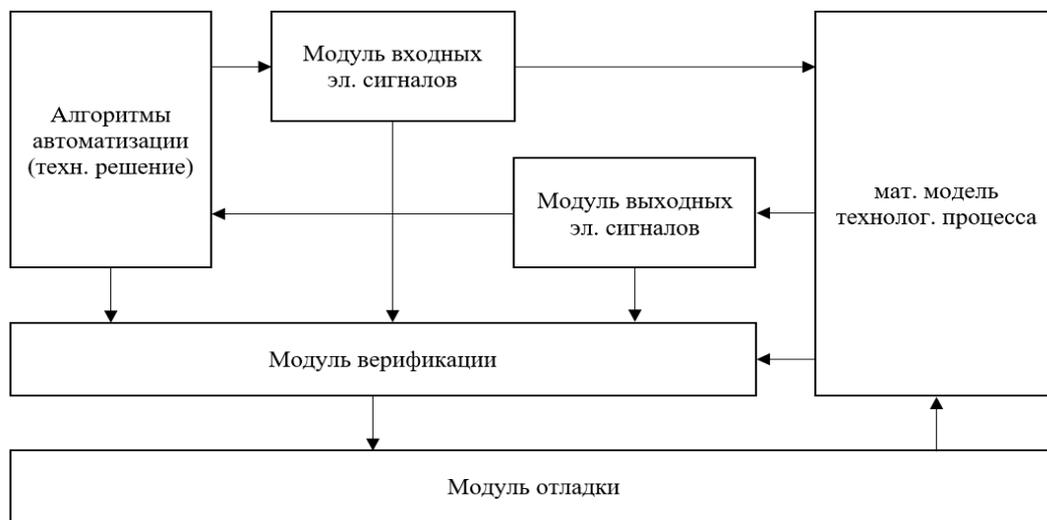


Рисунок 5 – Функциональная схема установки полунатурного моделирования.

Особенностью предложенной установки полунатурного моделирования является наличие модуля верификации сигналов, который на основании сравнения соответствующих физических и цифровых сигналов в режиме реального времени формирует заключение о достоверности, проводимого экспериментального исследования. Другой особенностью является наличие модуля оператора, который представляет собой оригинальную супервизорную систему основных параметров технологического процесса испытаний газогенератора. Оригинальность подтверждается полученным свидетельством о регистрации программ для ЭВМ (2021681222). Аппаратная реализация предложенного способа экспериментального исследования выполнена на базе ПЛК разработки National Instruments серии PXI.

Всего было проведено более 150 экспериментальных исследований за период с 2020 по 2022 гг, включающих проверку алгоритмов автоматизации на всей дроссельной характеристике газогенератора создаваемого турбореактивного двигателя. Графики экспериментального исследования показаны на Рисунке 6.

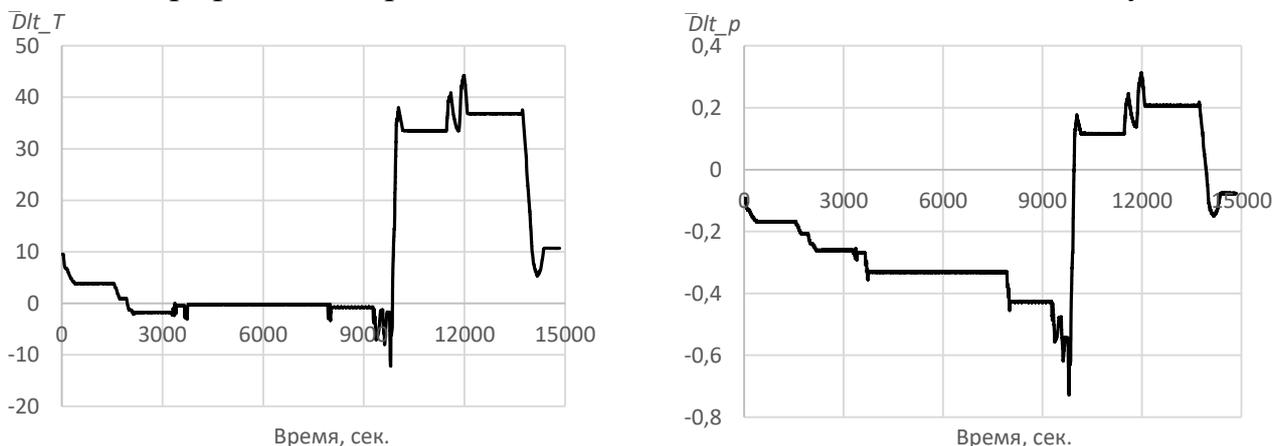


Рисунок 6 – Графики отклонение температуры и давления воздуха на входе газогенератора.

Результаты экспериментального исследования алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора подтвердили возможность имитации работы контура низкого давления, создаваемого турбореактивного двигателя с приемлемыми показателями точности. Максимальная ошибка управления по температуре не превышает $1\div 2\%$ от установившегося значения, а максимальная ошибка управления по давлению не превышает $3\div 4\%$ от установившегося значения. Вместе с этим необходимо отметить, что предлагаемые алгоритмы автоматизации гарантировано, обеспечили устойчивую работу элементов технологического процесса вне зависимости от режимов работы газогенератора и технологического двигателя.

Четвертая глава посвящена вопросам апробации алгоритмов автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора в условиях моторостроительного предприятия ОДК-Авиадвигатель.

Моторостроительное предприятие ОДК-Авиадвигатель является одним из ведущих предприятий в России по разработке газотурбинных двигателей авиационного и промышленного назначения. ОДК-Авиадвигатель является головным разработчиком семейства авиационных двигателей средней тяги в диапазоне $10\div 16$ тс и промышленных двигателей мощностью $6\div 16$ МВт на базе унифицированного газогенератора турбореактивного двухконтурного ПД-14. Этот проект является одним из приоритетов Государственной программы «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 гг». Апробация алгоритма автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя выполняется на базе специализированного испытательного комплекса для проведения научно-исследовательских испытаний газогенераторов семейства турбореактивных двухконтурных двигателей ПД в ОДК-Авиадвигатель.

Испытательный комплекс имеет развитую иерархическую структуру информационно-управляющей системы, которая позволяет осуществлять большие объемы измерений и объединяет все стендовые системы измерения и контроля в единую локальную компьютерную сеть для формирования единого информационного пространства. Поэтому схема взаимодействия алгоритмов автоматизации технологического процесса выполнена с учетом принципов автономности и равнозначности. Это предполагает независимую работу рассматриваемых систем с возможностью переключения между системами по команде оператора или при возникновении условий перехода. Основным условием для перехода между информационно-управляющей и автоматизированной системой является готовность автоматизированной системы обеспечить безопасность проведения испытаний газогенератора для текущего состояния процесса.

Аппаратная реализация алгоритмов автоматизации выполнена на базе ПЛК разработки National Instruments серии CompactRIO с использованием аппаратного резервирования каналов измерения. Дополнительно предложен способ повышения надежности, предлагаемого технического решения, где наряду с аппаратным резервированием каналов измерения, предложено аналитическое резервирование на основе оптимального наблюдателя с использованием фильтров Калмана и

Язвинского. Разработан пользовательский интерфейс для анализа алгоритмов автоматизации технологического процесса испытаний газогенератора в режиме реального времени.

Выполнена апробация алгоритмов автоматизации в процессе проведения исследовательских испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14 при последовательном изменении режима его работы от режима малого газа до крейсерского с выдержкой на основных установившихся режимах работы. Результаты апробации алгоритмов автоматизации испытаний газогенератора ПД-14 представлены на Рисунке 8.

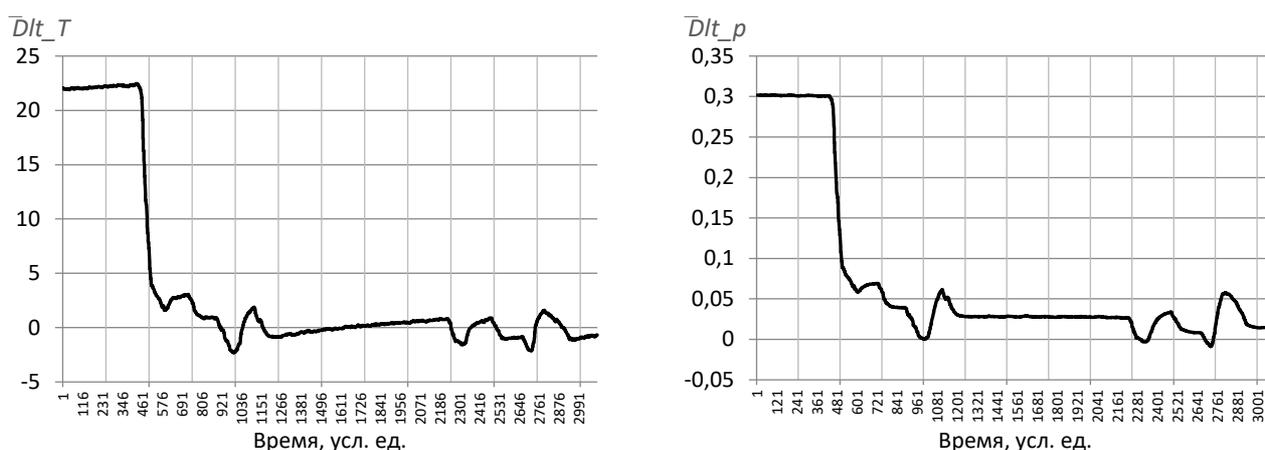


Рисунок 8 – Графики отклонения температуры и давления воздуха на входе газогенератора.

Максимальная ошибка управления по температуре воздуха на входе газогенератора не превышает 2÷3% от установившегося значения, а максимальная ошибка управления по давлению воздуха на входе газогенератора не превышает 3÷4% от установившегося значения. Вместе с этим необходимо отметить, что предлагаемые алгоритмы вне зависимости от режимов работы газогенератора и технологического двигателя гарантировано обеспечили устойчивую работу элементов технологического процесса, а именно гарантированное положение рабочей точки технологического двигателя в области его устойчивой работы. Предложенные решения обеспечили сокращение трудоемкости проведения технологического процесса испытаний до ~15% за счет уменьшения количества управляющих воздействий и как следствие уменьшение обслуживающего персонала, а также повышение надежности до ~25 % за счет уменьшения степени ручного труда при проведении доводочных и исследовательских испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14.

В заключении обобщены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Определено, что одним из высокоэффективных решений научно-исследовательских испытаний газогенератора с имитацией работы контура низкого давления турбореактивного двухконтурного двигателя является проведение испытаний с подогревом и наддувом воздуха на его входе в условиях

моторостроительного предприятия. Основным способом воспроизведения режима работы контура низкого давления является совместное изменение режима работы технологического двигателя и положения заслонок перепуска воздуха в стендовую систему выхлопа, что носит многоэтапный характер и в большинстве случаев характеризуется низким уровнем автоматизации, высокой долей ручного труда. При этом вопросы, связанные с математическим и алгоритмическим обеспечением автоматизированного технологического процесса подогрева и наддува воздуха, требуют дополнительной теоретической и практической проработки.

2. Разработана комплексная многопараметрическая математическая модель технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора. Отличительной особенностью является использование математических моделей газогенератора, технологического двигателя и воздуховода, учитывающих газодинамическое взаимовлияние, что позволяет исследовать особенности технологического процесса на установившихся и неустойчивых режимах. При этом математическое описание разработанной модели представляет собой систему из более чем ста нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, а также нелинейных алгебраических уравнений и зависимостей, реализованных с использованием программного обеспечения типа MATLAB Simulink.

3. Выполнено динамическое моделирование технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора, в том числе возможных нештатных ситуаций. Оценка достоверности математической модели выполнена сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными, где максимальная ошибка на установившихся режимах работы для $\bar{n}_{к\text{вд гг}}$, $\bar{n}_{к\text{нд тд}}$, $\bar{n}_{к\text{вд тд}}$, $\bar{p}_{\text{вх гг}}$, $\bar{p}_{к\text{вд гг}}$, $\bar{p}_{к\text{нд тд}}$ не превышает 3%, а максимальная ошибка на неустойчивых режимах работы не превышает 7%. При этом максимальная ошибка для $\bar{T}_{\text{вх гг}}$, $\bar{T}_{\text{т вд гг}}$, $\bar{T}_{к\text{нд тд}}$ составляет 11÷15%, что связано в большей степени с отсутствием математической модели измерительной системы испытательного комплекса. Результаты моделирования показали высокую сходимость с экспериментальными данными, что позволяет использовать разработанную математическую модель для экспериментального исследования алгоритмов автоматизации испытаний газогенератора.

4. Разработаны оригинальные алгоритмы автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора. Отличительной особенностью является независимое управление на основе эталонных математических моделей газогенератора и технологического двигателя, что позволяет минимизировать количество управляющих воздействий, в частности сокращение числа воздушных заслонок. При этом предложена реализация разработанных алгоритмов на основе теории нечеткой логики с учетом многомерности, нелинейности, а также априорной и апостериорной неопределенности технологического процесса испытаний. Сформирована оригинальная совокупность правил нечеткого управления, которая содержит более двадцати правил типа: «IF (Dlt_T is $Req_Increase_T$) AND (Dlt_T is $Control_T$) AND (Dlt_OP is not $Req_Decrease_OP$) THEN RUD is RUD_QF », учитывающих

конструктивные особенности оборудования рассматриваемого технологического процесса, а также определены виды термов фаззификации и дефаззификации. Программная реализация предложенного решения выполнена с использованием программного обеспечения типа MATLAB и LabVIEW, а общий объем программного обеспечения составляет не более 1 400 Кб.

5. Выполнено экспериментальное исследование алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора с использованием оригинальной высокопроизводительной установки полунатурного моделирования. Отличительной особенностью является наличие модуля верификации сигналов, который на основании сравнения соответствующих физических и цифровых сигналов в режиме реального времени формирует заключение о достоверности, проводимого экспериментального исследования. Другой особенностью является наличие модуля отладки, который представляет собой оригинальную супервизорную систему основных параметров технологического процесса испытаний газогенератора. Аппаратная реализация предложенной установки выполнена на базе программно-логического комплекса разработки National Instruments серии PXI. При этом максимальная ошибка управления по температуре не превышает $1\div 2\%$ от установившегося значения, а максимальная ошибка управления по давлению не превышает $3\div 4\%$ от установившегося значения, а также предлагаемый алгоритм гарантировано, обеспечил устойчивую работу элементов технологического процесса вне зависимости от режимов работы газогенератора и технологического двигателя.

6. Выполнена апробация алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора в условиях моторостроительного предприятия ОДК-Авиадвигатель в процессе проведения исследовательских испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14. Максимальная ошибка управления по температуре воздуха на входе газогенератора не превышает $2\div 3\%$ от установившегося значения, а максимальная ошибка управления по давлению воздуха на входе газогенератора не превышает $3\div 4\%$ от установившегося значения. Аппаратная реализация алгоритмов автоматизации процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора выполнена на базе программно-логического комплекса разработки National Instruments серии CompactRIO. Предложенные решения обеспечили сокращение трудоемкости проведения технологического процесса испытаний до $\sim 15\%$ за счет уменьшения количества управляющих воздействий и как следствие уменьшение обслуживающего персонала, а также повышение надежности до $\sim 25\%$ за счет уменьшения степени ручного труда при проведении доводочных и исследовательских испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя ПД-14. Результаты диссертации нашли практическое применение при создании впервые в отрасли малогабаритной системы имитации параметров полноразмерного двигателя на входе в испытуемый газогенератор от одного технологического двигателя для проведения научно-исследовательских испытаний газогенераторов перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей ПД-14, ПД-26, ПД-35 и др.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что использование предложенных результатов диссертации позволяет повысить уровень автоматизации технологического процесса подогрева и наддува воздуха на входе газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя и, соответственно, существенно снизить технические и финансовые риски создания турбореактивного двухконтурного двигателя. Таким образом, цель исследования достигнута, а поставленные задачи исследования решены.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus:

1. Inozemtsev, A. The Fuzzy Logic in the Problems of Test Control of a Bypass Turbojet Engine Gas Generator / A. Inozemtsev, A. Petrochenkov, V. Kazantsev, I. Shmidt, A. Sazhenkov, D. Dadenkov, I. Gribkov, P. Ivanov // Mathematics. – 2022. – №. 3. – P. 484.
2. Inozemtsev, A. On the Methods of Implementing the Turbofan Core Test Process Control Logic with Simulation of the Target Thermodynamic Parameters in the Conditions of the Engine OEM's Facility / A. Inozemtsev, I. Gribkov, B. Kavalero, I. Shmidt, I. Bakhirev, I. Ziyatdinov // 2021 International Scientific and Technical Engine Conference, Samara – 2021. – P. 1-6.
3. Shmidt, I. A. Simulation Complex for Debugging of Control Algorithms of the Test Bench / I. A. Shmidt, P. V. Ivanov, I. N. Gribkov // Journal of Physics: Conference Series, Perm – 2021. – P. 012005.

Публикации в научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

4. Грибков, И. Н. Математическая модель технологического процесса испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя / И. Н. Грибков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – №2 – С. 42-52.
5. Иноземцев, А.А. Алгоритмический метод повышения отказоустойчивости системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя / А. А. Иноземцев, Н. Г. Ламанова, А. Н. Саженов, И. Н. Грибков, А. С. Плешивых // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – №2 – С. 179-183.
6. Иноземцев, А.А. Научно-исследовательские испытания газогенератора перспективного турбореактивного двухконтурного двигателя с имитацией требуемых входных термогазодинамических параметров в условиях моторостроительного предприятия / А. А. Иноземцев, С. В. Торопчин, И. Н. Грибков, М. Д. Галлямов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2021.– №65 – С. 28-37.
7. Килин, Г.А. Перспективы нейросетевого моделирования для полунатурных испытаний систем автоматического управления сложными техническими объектами двигателестроения / Г. А. Килин, Б. В. Кавалеров, А. И. Суслов, И. Н. Грибков, А. С. Плешивых // Автоматизация в промышленности. – 2021. – №6 – С. 13-16.

8. Иноземцев, А.А. Синтез оптимального наблюдателя при отсутствии априорной информации о характеристиках шума возмущения системы автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя / А. А. Иноземцев, Н. Г. Ламанова, А. Н. Саженок, И. Н. Грибков, А. С. Плешивых // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2020. – №63 – С. 70-79.

9. Ламанова, Н.Г. Идентификация математической модели системы автоматического управления газотурбинного двигателя / Н. Г. Ламанова, А. С. Плешивых, И. Н. Грибков, А. И. Фатыков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – №31 – С. 121-135.

10. Иноземцев, А.А. Синтез оптимального наблюдателя при отказах в канале измерения систем автоматического управления и контроля турбореактивного двухконтурного двигателя / А. А. Иноземцев, Н. Г. Ламанова, А. Н. Саженок, И. Г. Лисовин, И. Н. Грибков, А. С. Плешивых // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – №57 – С. 162-171.

Патенты и свидетельства регистрации программы ЭВМ:

11. Пат. 2797897 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. Стенд автоматизированных испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя / А. А. Иноземцев, И. Н. Грибков, И. Г. Лисовин, А. Н. Саженок, М. Д. Галлямов ; заявитель и патентообладатель АО «ОДК-Авиадвигатель». – № 2022128745 ; заявл. 07.11.2022; опубл. 09.06.2023, Бюл. № 16. – 12 с.

12. Пат. 2789850 С1 Российская Федерация, МПК G05B 23/02. Способ исследования электронных систем управления сложными техническими объектами и стенд для исследования электронных систем управления сложными техническими объектами / И. Н. Грибков, И. Г. Лисовин ; заявитель и патентообладатель АО «ОДК-Авиадвигатель». – № 2022120123/07 ; заявл. 22.07.2022; опубл. 14.02.2023, Бюл. № 5. – 10 с.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681222 Российская Федерация. Моделирующий комплекс технологического процесса испытаний газогенератора турбореактивного двухконтурного двигателя : № 2021680414 : заявл. 08.12.2021 : опубл. 20.12.2021 / И. А. Шмидт, П. В. Иванов, И. Г. Лисовин, И. Н. Грибков, Д. А. Даденков, А. Б. Петроченков, Б. В. Кавалеров ; заявитель АО «ОДК».

14. Пат. 187791 U1 Российская Федерация, МПК G01M 15/04. Стенд для испытаний электронных агрегатов системы автоматического управления и контроля газотурбинного двигателя : № 2018139181 : заявл. 14.11.2017 : опубл. 19.03.2019 / И. Н. Грибков, А. А. Заборских, И. Г. Лисовин [и др.] ; заявитель АО «ОДК».

15. Пат. 2622588 С1 Российская Федерация, МПК G 01 M 15/14. Стенд для испытания газогенераторов турбореактивных двухконтурных двигателей / А. А. Иноземцев, М. Д. Галлямов, А. В. Двинских, И. Н. Грибков, А. И. Полулях ; заявитель и патентообладатель АО «ОДК-Авиадвигатель». – № 2016122365 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 16.06.2017, Бюл. № 17. – 7 с.

Остальные 9 работ опубликованы в материалах конференций.

Подписано в печать 22.12.2023. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 1,0. Формат 60×90/16. Заказ № 1980.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр. 29, к. 113.
Тел.: +7 (342) 219-80-33