

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04
по диссертации Титова Юрия Константиновича
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Диссертация «Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантированной устойчивостью» по специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления принята к защите «24» октября 2019 г. (протокол заседания № 4) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.04, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от 01 октября 2019 г. № 68-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, на кафедре «Автоматика и телемеханика».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Хижняков Юрий Николаевич, работает профессором кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Официальные оппоненты:

Муравьева Елена Александровна, доктор технических наук (05.13.06), профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал в г. Стерлитамак, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;

Греков Артем Владимирович, кандидат технических наук (05.13.05), доцент, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации», Федеральная служба национальной гвардии Российской Федерации.

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, г. Казань (отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной и инновационной деятельности, д-ром техн. наук, проф. Михайловым Сергеем Анатольевичем, заслушан на расширенном заседании кафедры «Автоматика и управление» и подписан д-ром техн. наук, проф. Дегтяревым Геннадием Лукичем, профессором кафедры «Автоматика и управление» и д-ром техн. наук, проф. Солдаткиным Владимиром Михайловичем, профессором кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»).*

По теме диссертации соискателем опубликовано 31 научный труд, в том числе 7 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени и приравненных к ним, из них 2 работы – в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, соискателем получено 10 патентов на изобретения. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Титов Ю.К.** Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя / Ю.П. Дудкин, Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н.Хижняков // Вестник Московского авиационного института. – 2010. – Т. 17. – № 6. – С. 55-60.

2. **Титов Ю.К.** Разработка адаптивного нейро-нечеткого регулятора частоты вращения вентилятора ТРДД / Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 47-50.

3. **Титов Ю.К.** Нейро-нечеткий регулятор частоты вращения ТВД на базе *Anfis*-сети / Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 11. – С. 20-23.

4. **Титов Ю.К.** Адаптивное управление авиационным двигателем в условиях неопределенности / Ю.П. Дудкин, Ю.К. Титов, Н.Н. Матушкин, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2013. – № 4. – С. 240-246.

5. **Титов Ю.К.** Проектирование адаптивного нечеткого регулятора положения дозатора ВРД / Ю.Н. Хижняков, Ю.К. Титов, А.А. Южаков // Электротехника. – 2018. – № 11. – С. 6-11.

6. **Titov Yu.K.** A way to increase the quality of the control loops of an aircraft engine / Yu.K. Titov, Yu.N. Khizhayakov, A.A. Yuzhakov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol 84. – No 11. – PP. 622-625 (Scopus).

7. **Titov Yu.K.** A way to Design an Adaptive Fuzzy Conroller for the Dispenser Position of an Air-Breathing Engine / Yu.K. Titov, Yu.N. Khizhayakov, A.A. Yuzhakov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol 89. – No 11. – PP. 621-626 (Scopus).

8. **Титов Ю.К.** Патент РФ на изобретение № 2474712 «Способ управления расходом топлива в газотурбинный двигатель» / Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин, С.В. Остапенко // Опубликовано: 10.02.2013 Бюл. № 4.

9. **Титов Ю.К.** Патент РФ на изобретение № 2480601 «Способ управления запуском газотурбинного двигателя» / Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин // Опубликовано: 27.04.2013 Бюл. № 12.

В указанных работах соискатель привел результаты разработки регулятора частоты вращения свободной турбины, основанного на принципах теории нечетких множеств; исследовал протекающие в системе процессы методом математического моделирования с использованием *Matlab-Simulink* и сравнил ПИД-регулятор и нечеткий регулятор; провел анализ алгоритмов адаптации фаззификатора; осуществил выбор вариантов построения терм-множеств управления дозатором; исследовал предложенный адаптивный нейро-нечеткий регулятор с целью удовлетворения динамики приемистости и устойчивости управления объекта с переменными коэффициентами; представил результаты оптимизации параметров нейро-нечеткого регулятора частоты вращения силовой турбины турбовального двигателя на базе *Anfis*-сети в среде *Matlab-Simulink*; провел сравнительный анализ работы классического ПИД регулятора и нейро-нечеткого регулятора; исследовал адаптивное

управление контура температуры газов за камерой сгорания и регулирования частоты вращения ротора вентилятора и показал, что оба параметра авиационного двигателя как в статике, так и в динамике, отвечают требованиям технической эксплуатации; представил результаты разработки и практической реализации системы управления расходом топлива в камере сгорания воздушно-реактивного двигателя; рассмотрел разработанный адаптивный астатический нечеткий регулятор управления дозатора; описал предложенный способ введения гарантированного запаса устойчивости в контурах управления авиационными двигателями; предложил методику проектирования виртуального датчика инерционности авиационного двигателя с целью коррекции режекторного фильтра в контуре с применением теории чувствительности; представил результаты разработки адаптивных нечетких элементов системы управления расходом топлива в камеру сгорания воздушно-реактивного двигателя; предложил адаптивный астатический нечеткий регулятор положения дозатора, состоящий из адаптивного фаззификатора и дефаззификатора, в фаззификаторе адаптация реализуется блоком, реализующим метод последовательного обучения.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая научная идея управления, подтвержденная моделями функционирования адаптивных нечетких регуляторов в контурах управления ВРД, методом проектирования адаптивных нечетких регуляторов с учетом требования систем реального времени, методом синтеза адаптивных фильтров с учетом изменения инерционности воздушно-реактивного двигателя (ВРД) в разных режимах работы, методом проектирования системы управления с гарантированной устойчивостью на основе модифицированного кругового критерия;

предложен оригинальный подход к управлению контурами ВРД, который включает количественный расчет инерционности ВРД (виртуальный датчик) для коррекции режекторных фильтров и модифицированный круговой критерий устойчивости на базе частотного показателя колебательности M ;

доказана перспективность использования предложенных идей в практике разработки адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров для управления ВРД;

введены новые термины (адаптивный нечеткий регулятор, виртуальный датчик инерционности ВРД) для корректного описания предложенного способа адаптивного нечеткого управления и фильтрации.

Теоретическая значимость исследования обоснована положениями, расширяющими границы применимости полученных результатов в области адаптивного нечеткого управления:

доказана результативность применения методов синтеза нечетких регуляторов и адаптивных фильтров для повышения надежности функционирования устройств систем управления ВРД;

использован комплекс базовых методов исследования нечетких множеств и адаптивного управления при разработке нечетких регуляторов и теории чувствительности для создания виртуального датчика инерционности ВРД;

изложены доказательства применимости методов адаптации нечетких регуляторов, основанные на методе последовательного обучения, в отличие от традиционных методов (эталонные модели) при разработке самонастраивающихся систем управления;

раскрыты существенные проблемы несоответствия при управлении ВРД в условиях параметрической неопределенности, что повлекло за собой необходимость разработки и внедрения адаптивных нечетких устройств;

изучены причинно-следственные связи показателей количественной оценки инерционности и фильтрующих свойств контуров управления ВРД, что потребовало коррекции режекторных фильтров;

проведена модернизация математических алгоритмов, обеспечивающая получение новых результатов фильтрации контуров управления ВРД.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана и внедрена методика проектирования адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью, включающая программный комплекс для математического моделирования адаптивных нечетких регуляторов, в результате применения которой время регулирования в переходном процессе уменьшилось на 15 %, и была обеспечена гарантированная устойчивость при изменении коэффициента усиления объекта управления в 15 раз;

определены перспективы и границы использования теории на практике технических решений устройств, позволяющие создавать регуляторы механизации ВРД и

позиционирования гидро- и пневмоцилиндров в других областях применения двигателей как объектов управления;

создана система практических рекомендаций по проектированию новых элементов систем управления ВРД;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию систем управления ВРД:

- развитие нейро-нечеткого управления для регуляторов типа MISO (много входов и один выход);

- применение предиктивного управления с целью исключения чистого запаздывания при цифровом управлении ВРД;

- применение нечеткого управления малоэмиссионной камеры сгорания с целью снижения вредных выбросов в атмосферу.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

воспроизводимость результатов исследования при разных режимах работы ВРД;

теория согласуется с опубликованными результатами исследований сторонних авторов по теме диссертации, представленных в открытой печати;

идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта, сравнении авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

использованы современные методики сбора и обработки экспериментальной информации.

Личный вклад состоит в непосредственном участии соискателя в получении исходных данных и проведении научных экспериментов, активном участии в апробации результатов исследования, разработке экспериментальных стендов и установок, участии автора в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-О: в ней изложены и научно обоснованы технические решения нечеткого управления недетерминированными объектами (воздушно-реактивными двигателями), в том

числе с учетом изменения их инерционных свойств, позволяющие выполнять коррекцию фильтрующих свойств контуров управления посредством применения модифицированного кругового критерия устойчивости на базе частотного показателя колебательности M , имеющие важное значения для совершенствования элементов и устройств систем управления в авиадвигателестроении.

На заседании «27» декабря 2019 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.05.04 принял решение присудить **Титову Юрию Константиновичу** ученую степень *кандидата технических наук* (протокол заседания № 8).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 16, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04,
д-р тех. наук, проф.

/ Южаков Александр Анатольевич /

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04,
д-р техн. наук, доц.

/ Фрейман Владимир Исаакович /