

На правах рукописи



Титов Юрий Константинович

**АДАПТИВНЫЕ НЕЧЕТКИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С
ГАРАНТИРОВАННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2019

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

Научный руководитель: **ХИЖНЯКОВ Юрий Николаевич**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **МУРАВЬЕВА Елена Александровна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Автоматизированные

технологические и информационные системы» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал в г. Стерлитамак

ГРЕКОВ Артем Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» ФГКВООУ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2019 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.04 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «29» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.04,
доктор технических наук, доцент



Фрейман В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие важных областей человеческой деятельности—транспорта, робототехники, энергетики, промышленного производства, требует совершенствования методов и средств управления техническими объектами, улучшения показателей качества, совершенствования устройств управления, снижения сроков, технических рисков и стоимости разработки.

Необходимость совершенствования методов и средств управления определяется тенденциями расширения практики использования «сложных» объектов, ужесточения требований к режимам эксплуатации систем управления, интеграции элементов систем управления встраиваемых систем. К значимым свойствам встраиваемых систем относят интеграцию элементов управления и объекта управления (ОУ), ориентированность на серийный промышленный выпуск и автономность функционирования. К системам такого рода предъявляются требования обеспечения вычислительной производительности, по сравнению с системами общего назначения, требования возможности реализации в бортовой авиационной аппаратуре.

Разработка устройств систем управления недетерминированными объектами, такими как воздушно-реактивные двигатели (ВРД), методами классической теории управления существенно затруднена, а порой и практически невозможна. Для решения подобных задач все большую значимость приобретает теория адаптивного нечеткого управления и теория чувствительности.

Решение задач повышения надежности эксплуатации, экономии топлива, снижения эксплуатационных затрат силовых установок на базе ВРД делают актуальным создание комплексных систем управления, аппаратно и программно интегрированных устройств, функционирующих на современных принципах управления недетерминированными объектами управления.

Актуальность разработки регуляторов адаптивного нечеткого управления, адаптивных фильтров, обеспечивающих гарантированный запас устойчивости замкнутой системы управления определяется тем, что известные из научных публикаций результаты НИОКР о существующих технических решениях создания САУ имеют следующие недостатки:

- при проектировании регуляторов ВРД разработчики ориентируются на среднестатистические характеристики двигателя по заданным параметрам заданным режимам работы двигателя, описываемые передаточными функциями эталонных моделей двигателя с переменными параметрами. При этом любые отклонения физического объекта от структуры передаточных функций не учитываются;

- при проектировании регуляторов ВРД не учитываются неконтролируемые возмущения, влияющие на объект управления (переменные параметры температуры и давления окружающей среды, возмущающие воздействия в электрической сети самолета и т.д.), так и на исполнительные механизмы (неконтролируемое изменение расхода топлива в дозаторе из-за

изменения плотности топлива вследствие изменения температуры или марки топлива);

- для ВРД, являющимся нелинейным ОУ и имеющим неполное математическое описание, применяются классические линейные П-, ПИ-, ПИД-регуляторы с набором жестко заданным настроек и коэффициентов.

- при проектировании регуляторов ВРД не учитываются возможные отклонения характеристик ВРД, возникающие в процессе эксплуатации;

- в применяемых классических регуляторах отсутствует адаптация к изменению фильтрующих свойств ВРД.

Существующая неполнота математического описания определяет проблему корректности оценки ВРД, как ОУ, и существующих подходов к проектированию регуляторов и фильтров с заданными характеристиками и с учетом обеспечения гарантированного запаса устойчивости.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в изучение и разработку устройств систем автоматического управления (САУ) силовых установок на базе ВРД внесли отечественные ученые А. А. Шевяков, С. А. Сиротин, О. С. Гуревич, Ф. Д. Гольберг, Б. А. Черкасов, В. Г. Августинович, В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков, Ю. М. Гусев, В. И. Васильев, Г. Г. Куликов и другие. В развитие работ данных авторов рассматривается разработка и применение адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров для управления ВРД.

Проектирование автоматических систем управления, основанное на использовании теории нечеткого управления, отражено в работах отечественных и зарубежных авторов С.Н.Васильева, Сигеру Омату, Марзуки Халид, Д. Рутковской, Д. Гроппа, В.В. Круглова, Ю.Н. Хижнякова, Н.Г. Ярушкина и других. В развитие работ данных авторов рассматривается разработка и применение адаптивных фильтров, входящих в состав САУ ВРД.

Применение принципов адаптивного нечеткого управления ВРД недостаточно отражено в отечественных и зарубежных публикациях, поэтому задача создания адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров с целью повышения надежности функционирования и качества систем управления недетерминированными (лингвистическими) объектами с обеспечением гарантированной устойчивости работы в условиях дрейфа частотных характеристик разомкнутой системы управления, состоящей из фильтра, регулятора и регулируемого объекта, является актуальной.

Все перечисленное обуславливает необходимость проведения теоретических исследований, разработку и внедрение адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров с гарантированным запасом устойчивости для управления ВРД.

Объект исследования—адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантированной устойчивостью.

Предмет исследования—методы синтеза адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью.

Цель диссертационной работы заключается в решении важной научной задачи повышения качества и надежности функционирования устройств систем

управления на основе методов синтеза адаптивных нечетких устройств, обеспечивающих высокое качество управления и гарантированную устойчивость систем управления.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Разработать метод проектирования адаптивных нечетких регуляторов для систем управления с учетом обеспечения требований к встроенным системам реального времени.

2. Разработать метод синтеза адаптивных фильтров с целью улучшения качества управления с учетом изменения инерционности ОУ в разных режимах работы.

3. Разработать метод проектирования, обеспечивающего гарантированную устойчивость и надежность функционирования устройств систем управления на основе применения адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

4. Внедрить разработанные методы, алгоритмы и программы реализации в процессы проектирования, подтвержденные результатами исследования, с целью повышения надежности функционирования устройств САУ ВРД различного назначения и в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

1. Разработан оригинальный метод анализа и синтеза нечетких регуляторов управления двигателем, который основан на преобразовании четкой информации в нечеткую, отличающийся применением адаптивного алгоритма, обеспечивающего требования, предъявляемые к бортовым встроенным системам реального времени.

2. Создан новый метод анализа и синтеза адаптивных фильтров, оригинальность которого заключается в том, что для улучшения фильтрующих свойств замкнутой системы управления учитывается количественное изменение инерционности, как характеристики ОУ, на разных режимах работы.

3. Предложен метод обеспечения надежности функционирования систем управления недетерминированными объектами, основанный на применении условного критерия устойчивости, отличающийся тем, что обеспечивает гарантированный запас устойчивости,.

Область исследования соответствует положениям паспорта научной специальности 05.13.05—Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, а именно: п. 3 «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик, п. 4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новый подход к синтезу адаптивных нечетких регуляторов для систем управления с учетом обеспечения требований к встроенным системам реального времени (п.3).

2. Решение задачи синтеза адаптивных фильтров с целью улучшения качества управления ВРД с учетом изменения его инерционности на разных режимах работы (п.3).

3. Предложенный метод обеспечения надежности функционирования с гарантированной устойчивостью устройств систем управления на основе разработанных адаптивных нечетких регуляторов и фильтров (п.4).

4. Результаты апробации и внедрения предложенных подходов к синтезу адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью, алгоритмы и программы реализации, разработанные в рамках данной работы на основе предложенных методов, внедренные в бортовой авиационной аппаратуре управления параметрами ВРД и в учебный процесс (п.4).

Методология и методы исследования базируются на методах теории автоматического управления, нечеткой логики, теории управления, на аналитическом и имитационном моделировании, теории планирования эксперимента, экспериментах и на обработке результатов экспериментов.

Достоверность приводимых в работе результатов и выводов обеспечивается корректным применением математического аппарата моделирования и не противоречат известным решениям других авторов. Основные расчетные соотношения, полученные в работе, подтверждаются соответствием результатов имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальных данных, полученных в процессе внедрения и опытной эксплуатации устройств, реализованных в системах управления.

Практическая значимость работы заключается в использовании структур элементов и устройств, полученных на основании предложенных в работе методов, обеспечивающих достижение нового качества управления при отсутствии точного математического описания или при полном отсутствии математического описания ОУ, в условиях неопределенности изменения характеристик ОУ на основе применения адаптивных элементов и обеспечения гарантированного запаса устойчивости систем управления.

Результаты диссертационной работы по созданию адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров, реализованные в виде методик проектирования и расчета параметров регуляторов, алгоритмов и программ использованы на предприятии АО «ОДК-СТАР» (г. Пермь) при создании САУ ТРДД средней и малой размерности.

Разработанные в диссертации теоретические положения и практические разработки используются в учебном процессе в рамках программ магистратуры ПНИПУ (г. Пермь) по направлению подготовки «Управление в технических системах».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы, по мере их разработки и получения результатов, обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях и семинарах: XXXXI

Всероссийский симпозиум «Механика и процессы управления» (2011, Москва), III Всероссийский конкурс молодых ученых (2011, Москва), 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика–2012 (2012, Москва), научно–практическая конференция «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (2013, Челябинск), всероссийский научно–технический совет, организованный АО «ОДК-СТАР» под эгидой Международной ассоциации «Союз газотурбинного двигателестроения», по теме «Перспективные САУ ГТД. Направления развития, проблемы и пути их решения» (2016, Пермь), 14 Всероссийская школа–конференция молодых ученых «Управление большими системами» (2017, Пермь), Международная научно–техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (2018, Самара)

Личный вклад автора. Представленные в работе результаты, основные технические решения получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор диссертационного исследования внес определяющий вклад в постановку задач исследований, выбор направления и методов исследований, организацию и проведение экспериментальных и исследовательских работ, их реализацию, интерпретацию и обобщение полученных результатов, во внедрение результатов работ.

Личный вклад автора в работах [1, 2, 5] заключается в разработке и исследовании в качестве элементов САУ ВРД адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров. В работе [3] автор предложил исследовать и реализовать нейронечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины ТВД на базе Anfis–сети. В статье [4] автором предложено проектировать системы управления с гарантированным запасом устойчивости, обеспечивающим устойчивую работу замкнутой системы управления при изменении характеристик ОУ в процессе работы.

Публикации. Основные положения диссертационного исследования нашли отражение в 31 публикациях автора, относящихся к теме исследования. В их числе: 5 публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях, 2 публикации в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus, 10 патентов России на изобретения, а также 14 публикаций в других изданиях, в том числе материалы конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 204 страницы, из которых основной текст составляет 151 страницу и включает 86 рисунков и 6 таблиц. Список литературы из 114 наименований, семь приложений на 38 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** рассматривается предмет, цель, задачи совершенствования адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантируемой устойчивостью, научная новизна, практическая значимость работы, основные защищаемые положения и доказательства их достоверности.

Первая глава посвящена анализу современного состояния управления ВРД. Развитие газотурбинного двигателестроения в настоящее время характеризуется совершенствованием двигателей с целью достижения высоких

удельных параметров. Выполнен анализ существующих методов управления ВРД. При создании современных модификаций двигателей и замене гидромеханических систем на робастные электронные цифровые системы необходимо иметь математическое описание двигателя, характеризующееся априорной неопределенностью в силу эмпиричности процесса. В современных цифровых САУ ВРД широкое распространение для регулирования параметров двигателя получил ПИД-закон регулирования, у которого пропорциональная часть обеспечивает усиление (форсировку) управляющего воздействия, интегральная часть исключает ошибку в статическом состоянии ОУ, а дифференцирующая часть компенсирует фазовое отставание выходного сигнала, вносимое операцией интегрирования и переходным чистым запаздыванием ВРД. Как показывает опыт эксплуатации, ПИД-регуляторы эффективны только для объектов с неизменными характеристиками и практически не обладают способностью парирования действия на ВРД внешних возмущений и компенсации изменения коэффициентов усиления ВРД по ресурсу. Кроме того, реальные статические характеристики двигателей в процессе эксплуатации изменяются и ранее рассчитанные настройки регуляторов в контурах управления становятся не оптимальными. Таким образом, при расчете параметров системы управления необходимо учитывать изменение характеристик двигателей в процессе эксплуатации. Отсюда возникает задача совершенствования способов управления, создания новых регулирующих устройств ВРД, обеспечивающих устранение выявленных в результате анализа недостатков классических регуляторов.

Неопределенность характеристик ОУ вызывает необходимость применения нечеткого регулирования, где при анализе и синтезе не требуется математическая модель ОУ, и свойства последнего могут существенно меняться под воздействием внешних возмущений (изменение параметров воздушного потока на входе в двигатель, резкое изменение нагрузки на силовой турбине и т.д.) или по ресурсу. Предлагаются варианты разработки средств управления ВРД на базе специализированной сети *Anfis* и на базе адаптивных нечетких регуляторов, обеспечивающие заданные характеристики качества, быстродействия и надежности САУ.

Разработка способов управления с адаптацией к внешним условиям, с применением нелинейных аппроксиматоров является одним из возможных путей повышения качества управления ВРД. Для математического моделирования новых методов управления ВРД используются линейные или нелинейные динамические модели ОУ.

Отмечается, что основные тенденции совершенствования САУ ВРД связанные с применением интеллектуальных технологий управления, основанных на знаниях (алгоритмов нечеткого управления), с исследованием инерционности ОУ, с введением гарантируемого запаса устойчивости замкнутой системы управления, представляет собой актуальную задачу на современном этапе развития двигателестроения.

Во второй главе рассмотрены модели и синтез адаптивных нечетких регуляторов. В процессе исследований рассмотрены две модели САУ, на

примере управления частотой вращения силовой турбины ВРД, обладающие адаптивными свойствами и работающие в условиях неполной информации об объекте управления или в условиях изменения характеристик ОУ в процессе эксплуатации.

Первая модель, построенная на основе специализированной сети *Anfis*, выбрана для рассмотрения в ходе данного исследования, чтобы продемонстрировать возможность адаптивного управления таким объектом, как ВРД с использованием искусственной нейронной сети, основанной на нечеткой системе вывода Такаги-Сугено.

Вторая модель, построенная на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации, синтезируется и исследуется с целью обеспечения следующих, необходимых для авиационной техники, характеристик системы управления: наличие адаптивных свойств, парирующих изменение характеристик ОУ, обеспечение гарантированной устойчивости, возможность автоматической работы в качестве элементов встроенной системы управления в бортовой авиационной аппаратуре в «жестком» реальном времени, в условиях невозможности реализации цикла обучения тех элементов системы управления, которые отвечают за адаптивность.

Выполнен синтез алгоритма управления адаптивного нечеткого регулятора (АНР). Выбор для рассмотрения контура управления частотой вращения силовой турбины или вентилятора обусловлен тем, что этот контур является задающим контуром для большинства типов ВРД.

Проведен анализ результатов исследования возможности применения регуляторов, основанных на нечеткой логике (fuzzy logic) для управления ВРД. Рассмотрена специализированная сеть *Anfis* (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*) в качестве нечеткого регулятора, реализующая алгоритм нечеткого вывода Такаги-Сугено. На рисунке 1 представлено устройство стабилизации частоты вращения силовой турбины с адаптивным нечетким регулятором на базе сети *Anfis*.

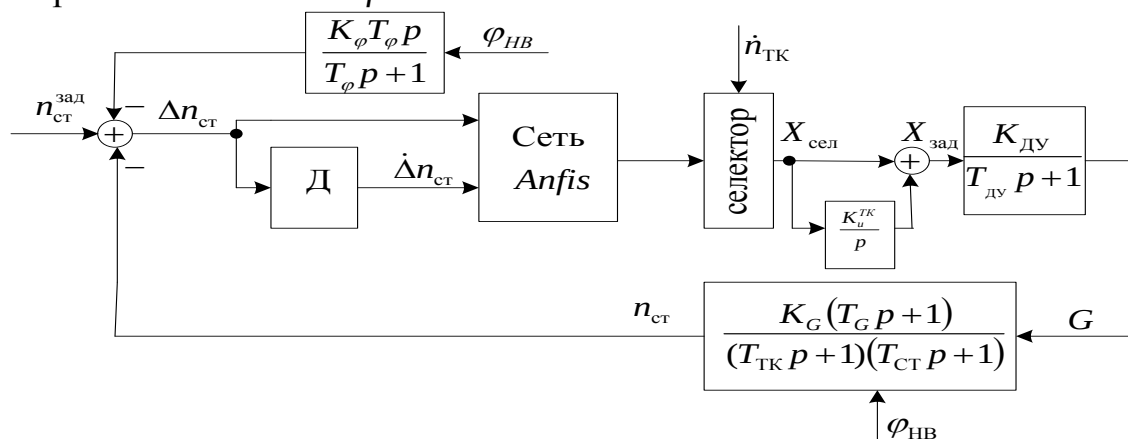


Рисунок 1 – Устройство стабилизации частоты вращения на базе сети *Anfis*

Устройство стабилизации частоты вращения состоит из следующих элементов замкнутой САУ: ОУ, датчики, сервопривод дозатора топлива, устройство ввода воздействия, сеть *Anfis*. Сеть *Anfis* имеет две входные лингвистические переменные: ошибка регулирования, представляющая собой

рассогласование между требуемой и фактической частотами вращения силовой турбины, и скорость изменения ошибки регулирования, полученная на выходе дифференциатора Д. Сигнал рассогласования учитывает производную угла поворота датчика нагрузки силовой турбины. Фаззификатор сигнала ошибки регулирования представлен как терм-множество из трех терм, а фаззификатор сигнала скорости изменения ошибки регулирования-двумя термами. В качестве терм фаззификаторов приняты функции Гаусса, которые допускают дифференцирование. База знаний содержит четыре продукционных правила, что достаточно для получения желаемого переходного процесса регулирования. Обучение *Anfis* -сети выполнено методом обратного распространения ошибки (ОРО) и методом наименьших квадратов (МНК) в связи с тем, что алгоритм ОРО относится к быстрым алгоритмам обучения нейронных сетей, а метод МНК оценивает коэффициенты заключения правил, так как они линейно связаны с выходом сети.

Для оптимизации нечеткого регулятора использован инструментальный пакет *Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset)* среды *Matlab-Simulink*, который предоставлен в распоряжение пользователя для настройки параметров динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов. В качестве средства достижения указанной цели принимается оптимизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. Оптимизация выполнялась для наземных условий при $T_n = 288$ К, $P_n = 1,033$ кгс/см² при возмущении по углу несущего винта: на приемистости, φ : с 0 на 16 градусов за 3 с. и на сбросе, φ : с 16 на 0 градусов за 2 с. На рисунке 2 приведены осциллограммы переходных процессов в системе регулирования частоты вращения силовой турбины ВРД с ПИД – регулятором (lin) и с ненастроенным (fuzzy) и настроенным (fuzzy opt) нечетким регулятором на базе сети *Anfis*.

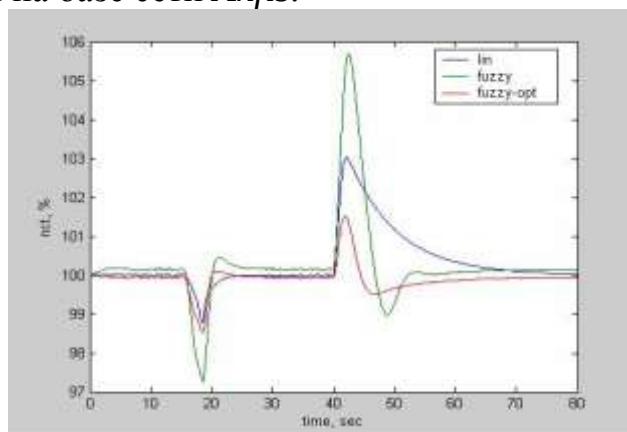


Рисунок 2 –Переходные процессы в системе регулирования с ПИД – регулятором и нечетким регулятором на базе сети *Anfis*.

Сравнительный анализ результатов проведенного модельного эксперимента показал, что перерегулирование с настроенным нечетким регулятором уменьшилось в четыре раза по сравнению с ненастроенным нечетким регулятором и в два раза по сравнению с ПИД-регулятором. Время переходного процесса сократилось в три раза по сравнению с ПИД-регулятором.

Выявленным недостатком разработанного АНР на базе сети *Anfis* является длительное время обучения, что не согласуется с требованиями, предъявляемыми к бортовым авиационным системам управления.

Адаптивный нечеткий регулятор на базе сети *Anfis* может быть рекомендован к применению в автоматизированных системах управления в промышленности, например для управления ВРД промышленными энергетическими установками.

Для повышения качества управления в условиях неполного или некорректного математического описания характеристик ОУ и в качестве элемента системы управления для применения в бортовой авиационной аппаратуре в настоящей работе предложено применение АНР, построенного на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации и блока дефаззификации с применением метода разности площадей. От известных в настоящее время нечетких регуляторов, адаптивный нечеткий регулятор, предложенный в настоящей работе, отличается тем, что обладает свойствами адаптивности. В адаптивном нечетком регуляторе элементы, выполняющие функции адаптации, участвуют в работе фаззификатора нечеткого регулятора. Предложенный подход к синтезу адаптивных нечетких регуляторов, в котором, в отличие от известных методов, нечеткому регулятору придаются адаптивные свойства, учтены требования реального времени и реализуемости в бортовой аппаратуре, характеризует новизну настоящей работы. Адаптивный нечеткий регулятор, представлен моделью №2.

На рисунке 3 приведено устройство стабилизации частоты вращения вентилятора ВРД на базе АНР, где вход Δn_1 —ошибка регулирования, Φ —фаззификатор, ДФ—дефаззификатор, АФ—адаптивный фаззификатор с фаззификатором Φ , коэффициентами усиления $\phi_a, \phi_b, \phi_c, \phi_d$, степенями принадлежности a, b, c, d и алгоритмом адаптации, реализованные в вычислителе, выход—управляющее воздействие к дозатору ВРД.

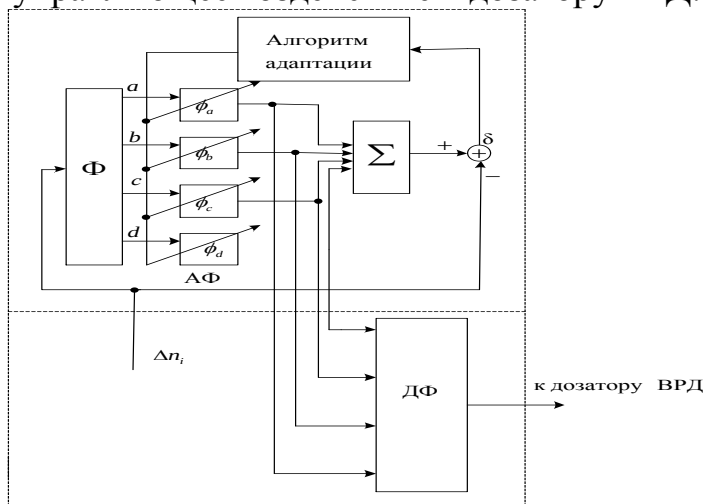


Рисунок 3 – Устройство стабилизации частоты вращения на базе АНР

В состав АНР входят датчики (на схеме не показаны), адаптивный фаззификатор и дефаззификатор, реализованные в вычислителе, исполнительный механизм в дозаторе. Терм-множество адаптивного

фаззификатора содержит четыре линейных терма: отклонение отрицательное большое ОБ, отрицательное малое ОМ, положительное малое ПМ, положительное большое ПБ, которые показаны на рисунке 4 (Терм-множество фаззификатора АНР частоты вращения вентилятора ВРД). На выходе фаззификатора Ф формируются степени принадлежности с помощью унимодальной функции принадлежности (синглетон), перемещающегося в нормированном интервале $-1, 0, +1$ синхронно с ошибкой отклонения. Для придания адаптивных свойств дополнительно введен сумматор, охваченный обратной связью блоком адаптации с алгоритмом адаптации методом последовательного обучения. Элемент сравнения в цепи обратной связи сравнивает фактический сигнал с выхода сумматора с желаемым сигналом (ошибка регулирования). Алгоритм адаптации подстраивает коэффициенты вектора входных сигналов (степени принадлежности) так, чтобы свести к нулю ошибку на выходе элемента сравнения с применением рекуррентной формулы

$$\phi_{j+1} = \phi_j + C_1 \delta_j \frac{\Delta n_j}{(\Delta n_j)^T \Delta n_j}, \quad (1)$$

где ϕ_{j+1} – последующий шаг $(j+1)$ -итерации; ϕ_j – предыдущий шаг j -итерации; Δn_j – дискретная форма j -итерации входного сигнала; $\delta_j = n_{\text{зад}} - n_j$ – ошибка в оценке Δn_j ; T – транспонирование; C_1 – коэффициент коррекции.

При выключенном сумматоре степени принадлежности с выхода фаззификатора всегда равны единице и регулятор не проявляет адаптивных свойств. При включении сумматора происходит коррекция степеней принадлежности a, b, c, d , где сумма текущих значений степеней принадлежности всегда меньше единицы и равна ошибке регулирования.

Скорректированные сигналы с выхода адаптивного фаззификатора АФ подаются на дефаззификатор. Обратное преобразование нечетких значений в четкие значения выполнено на дефаззификаторе с помощью метода разности площадей.

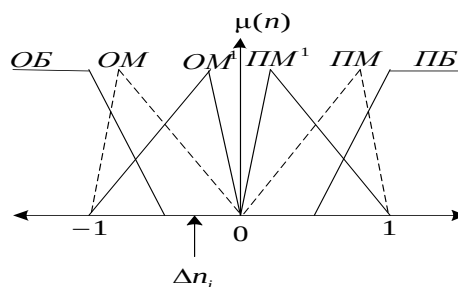


Рисунок 4 – Терм-множество фаззификатора АНР частоты вращения вентилятора ВРД

Предложенный подход использовался при построении адаптивных нечетких регуляторов статических и динамических контуров управления ВРД: частоты вращения ротора силовой турбины, частоты вращения ротора турбокомпрессора высокого давления (КВД), ограничителя частоты вращения ротора КВД, ускорения ротора КВД на приемистости, замедления ротора КВД

на сбросе режима работы ВРД. Предложенный метод синтеза АНР с применением адаптивного фаззификатора и выбранным методом адаптации фаззификатора и дефаззификатора, обеспечивает реализуемость АНР в бортовой авиационной аппаратуре, не требует длительной процедуры обучения и запоминания массива коэффициентов, обеспечивает желаемые переходные процессы в системе управления.

К недостаткам следует отнести более сложный процесс настройки АНР при его синтезе. Для упрощения этого процесса разработана инженерная методика синтеза и настройки АНР.

Технические решения, полученные при разработке адаптивных нечетких регуляторов позволяют создавать регуляторы сервоприводов для позиционирования гидроцилиндров в промышленности и на транспорте.

В третьей главе для компенсации действия на САУ ВРД внешних и внутренних помех предложен метод построения адаптивного фильтра с применением функции чувствительности для количественной оценки текущей инерционности ОУ и алгоритм расчета гарантируемого запаса устойчивости при вариациях годографа разомкнутой системы управления.

Исследования инерционности ВРД базируется на расчете функции чувствительности изменения параметров передаточной функции конкретного ВРД с целью дальнейшего определения пределов интегрирования для оценки площади показателя инерционности, определяемой как области на плоскости, ограниченной функцией чувствительности и осью времени.

В ходе разработки метода построения адаптивного фильтра с применением функции чувствительности для количественной оценки текущей инерционности ВРД проведена количественная оценка инерционности ВРД по параметру температуры газа за камерой сгорания.

Если принять, что передаточная функция ВРД имеет вид

$$W(p) = \frac{K_{\partial\partial}^T (T_5 p + 1)}{(T_1 p + 1)}. \quad (2)$$

После дифференцирования передаточной функции (2) по параметрам T_1 , T_5 и $K_{\partial\partial}^T$ получим следующие функции чувствительности ВРД

$$F_{T_1}(t) = \frac{d(W(p))}{d(T_1)} = -t \frac{K_{\partial\partial}^T \left(1 - \frac{T_5}{T_1}\right)}{T_1^2} e^{-\frac{t}{T_1}}; \quad (3)$$

$$F_{T_5}(t) = \frac{d(W(p))}{d(T_5)} = \frac{K_{\partial\partial}^T}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}; \quad F_{K_{\partial\partial}^T}(t) = \frac{d(W(p))}{d(K_{\partial\partial}^T)} = -\left(\frac{T_5}{T_1} + 1\right) e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (4)$$

Интегрируя функции чувствительности, определяем численные значения площадей (инерционности) ВРД для значений параметров T_1 , T_5 и $K_{\partial\partial}^T$:

$$S_{F_{T_1}} = \frac{K_{\partial\theta}^T \left(1 - \frac{T_5}{T_1}\right) \left(T_1 e^{-\frac{t_1}{T_1}} - T_1 - t_1 e^{-\frac{t_1}{T_1}}\right)}{T_1}; \quad S_{F_{T_5}} = \frac{K_{\partial\theta}^T t_2 e^{-\frac{t_2}{T_1}}}{T_1}; \quad S_{K_{\partial\theta}^T} = -t_3 \left(\frac{T_5}{T_1} + 1\right) e^{-\frac{t_3}{T_1}} \quad (5)$$

Численное значение текущей инерционности ВРД определено как результирующая площадь показателя инерционности.

На рисунке 5 представлена характеристика инерционности регулятора управления температурой газа за камерой сгорания ВРД, гарантирующая помехозащищенность работы газотурбинного двигателя.

Существующие в современной практике двигателестроения технические требования к САУ ВРД при разработке адаптивных фильтров ставит задачу обеспечения заданной частоты среза по всем контурам управления ВРД.

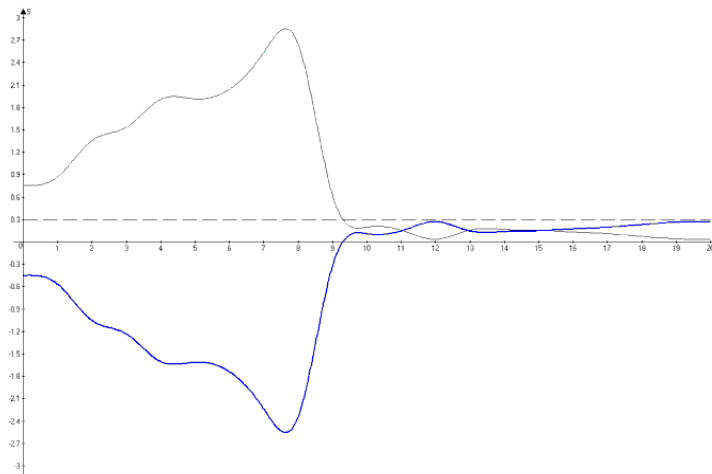


Рисунок 5 – Характеристика инерционности регулятора,

где– S численное значение инерционности ОУ (усл.ед*t), N номер комбинации параметров (б/р), синяя линия – инерционность регулятора, тонкая сплошная линия – инерционность двигателя, пунктирная линия – желаемая инерционность

Коррекция инерционности ОУ, реализуемая в корректирующих звеньях системы управления необходима для того, что бы функционирование замкнутой системы управления не зависело от изменения характеристик ОУ. Как правило, желаемое значение инерционности замкнутой системы управления выбирается постоянным. В соответствии с предложенным методом, рассчитывается инерционность двигателя по всем регулируемым параметрам двигателя.

Полученная информация об инерционности двигателя позволяет более точно изменять параметры фильтров. Предложено реализовать в системе управления расчет инерционности ОУ в виде «виртуального датчика инерционности» и его выходной сигнал включить в процесс управления по расчетному, не измеряемому параметру, что повысит адаптивные свойства системы управления и в целом улучшит качество управления параметрами двигателя. Адаптивный фильтр, учитывающий инерционность ОУ, обеспечивает требуемую устойчивость по фазе замкнутой системы управления при любых изменениях параметров ОУ.

В условиях неполного или некорректного математического описания ОУ или при полном его отсутствии замкнутая система регулирования должна обладать гарантированным запасом устойчивости.

Для повышения расчетной устойчивости системы управления предложен **метод обеспечения гарантированного запаса устойчивости** по амплитуде и фазе.

Предложенный метод обеспечения гарантированного запаса устойчивости контуров для управления ВРД базируется на модифицированном критерии Найквиста, где опасная точка с координатами $(-1, j0)$ находится в запретной области с индексом M , являющимся частотным показателем колебательности, введенным как

$$M = \frac{A(\omega_p)}{A(0)}, \quad (6)$$

где $A(\omega_p)$ – амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы на резонансной частоте, соответствующей точке максимума АЧХ на резонансной частоте; $A(0)$ – амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы при нулевой частоте.

Запас устойчивости замкнутой системы управления определяется степенью удаления годографа $W(j\omega)_{pc}$ от «опасной» точки с координатами $(-1, j0)$ и количественно равен величине обратной передаточной функции замкнутой системы $|\Phi(j\omega)|_{\max}$. Чем больше $|\Phi(j\omega)|_{\max}$, тем ближе годограф $W(j\omega)_{pc}$ приближается к «опасной» точке, и тем меньше запас устойчивости САУ (рисунок 6). При любых изменениях параметров САУ не потеряет практической устойчивости, хотя теоретически она будет находиться на границе устойчивости.

При значениях частотного показателя колебательности $M = 1,1 \dots 1,8$ предельный запас устойчивости разомкнутой САУ определяется по амплитуде

$$C_{\text{пред}} = \frac{1}{(M+1)K_{\text{дв}}K_{\text{ди}}} = 0,91 \dots 0,56, \quad (7)$$

а предельный запас по устойчивости фазе .

$$\gamma_{\text{пред}} = \arccos\left(1 - \frac{1}{2M^2}\right) \geq \arctg\omega T_1 - \arctg\omega T_5 - \arctg\omega T_{\text{дв}} - 0,5\pi. \quad (8)$$

Из примера расчета гарантированного запаса устойчивости контура температуры газа за камерой сгорания ВРД по амплитуде и фазе, представленного в работе, следует, что при заданном значении частотного показателя колебательности $M = 1,12$ радиус окружности «опасной» области $r = 41,915$ с расстоянием удаления центра от начала координат $R = 42,418$.

Таким образом, при выполнении мероприятий по обеспечению гарантированного запаса устойчивости, запас устойчивости по амплитуде увеличился на 30% ($c = 0,3$), а запас устойчивости по фазе на 39,24 град. – ($\gamma_{\text{пред}} = 39,24$).

Исследование гарантированной устойчивости АНР и содержащего в своем составе адаптивный фильтр, выполнено путем проверки работы регулятора с

ОУ, имеющим некорректное математическое описание. На рисунке 7 приведены осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания ВРД при имитации некорректного математического описания ОУ. Некорректное математическое описание реализовано путем увеличения наклона скоростной характеристики дозатора в 15 раз, что соответствует увеличению коэффициента усиления замкнутой системы управления в 15 раз.

Рисунок 6 – К примеру расчета гарантируемого запаса устойчивости ВРД по амплитуде и фазе

В замкнутой САУ с адаптивным нечетким регулятором и адаптивным фильтром обеспечивается гарантированный запас устойчивости при возможных вариациях параметров элементов системы управления.

Рисунок 7 – Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания ВРД

Как показали проведенные исследования по обеспечению гарантированного запаса устойчивости, в условиях действия параметрических возмущений, обусловленных некорректностью математического описания ОУ, классический регулятор в связи с отсутствием адаптивных свойств не обеспечивает устойчивость и качество управления. Предложенный адаптивный нечеткий регулятор имеет лучшие показатели быстродействия и качества, обладает гарантированным запасом устойчивости.

Полученные показатели устойчивости адаптивной нечеткой системы управления превосходят аналогичные показатели классического ПИД-регулятора в 15 раз.

В **четвертой** главе приведены алгоритмы, программы и результаты реализации разработанных в рамках данной работы на основе предложенных методов адаптивных нечетких регуляторов, фильтров, работающих в реальном времени в бортовой авиационной аппаратуре, на примере контуров управления параметрами ВРД, которые внедрены АО «ОДК-СТАР» в САУ ТРДД средней и малой размерности.

Предложенные адаптивные нечеткие регуляторы и фильтры, обеспечивающие гарантированный запас устойчивости замкнутой системы управления, внедрены в электронные регуляторы двигателей средней и малой размерности. Внедренные адаптивные нечеткие регуляторы реализованы на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации и дефаззификатора.

В регуляторе электронном двигателя (РЭД) адаптивным нечетким регулятором реализована защита от превышения предельных параметров двигателя. Обеспечен гарантированный запас устойчивости регуляторов, обеспечивающих защиту от превышения предельных параметров. Пример графического представления гарантированного запаса устойчивости по амплитуде и фазе для системы управления двигателем по параметру температуры газов приведен на рисунке 8.

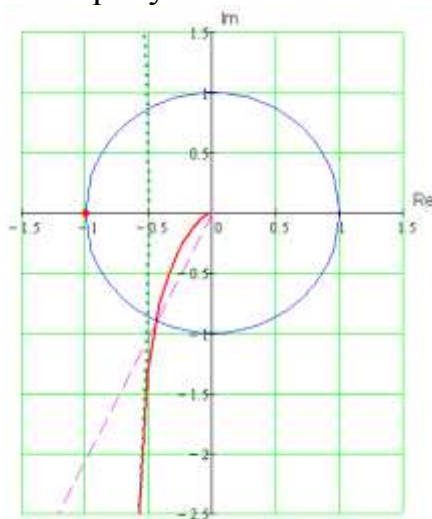


Рисунок 8 – Графическое представление гарантированного запаса устойчивости, где

- годограф $W(j\omega)_{pc}$;
- единичная окружность;
- - - луч, проведенный из начала координат через точку пересечения годографа $W(j\omega)_{pc}$ с единичной окружностью;
- граница «опасной» области с радиусом $r = 41.915$ и центром в точке $(-42.418, j0)$.

В комплексном регуляторе двигателя (КРД) адаптивным нечетким регулятором реализован контур частоты вращения ротора каскада высокого давления, воздействующий на контур управления положением дозирующего устройства, который в свою очередь, тоже реализован адаптивным нечетким регулятором.

Реализация контура частоты вращения ротора высокого давления адаптивным нечетким регулятором вызвана тем, что в данной системе отсутствуют датчики параметров воздуха на входе в двигатель (температура и давление воздуха). В зависимости от параметров воздуха на входе, двигатель, как ОУ, меняет свои характеристики и учесть эти изменения в коэффициентах усиления ПИД-регулятора не представляется возможным. Вследствие чего с ПИД-регулятором невозможно получить желаемые переходные процессы во всех высотно-климатических условиях.

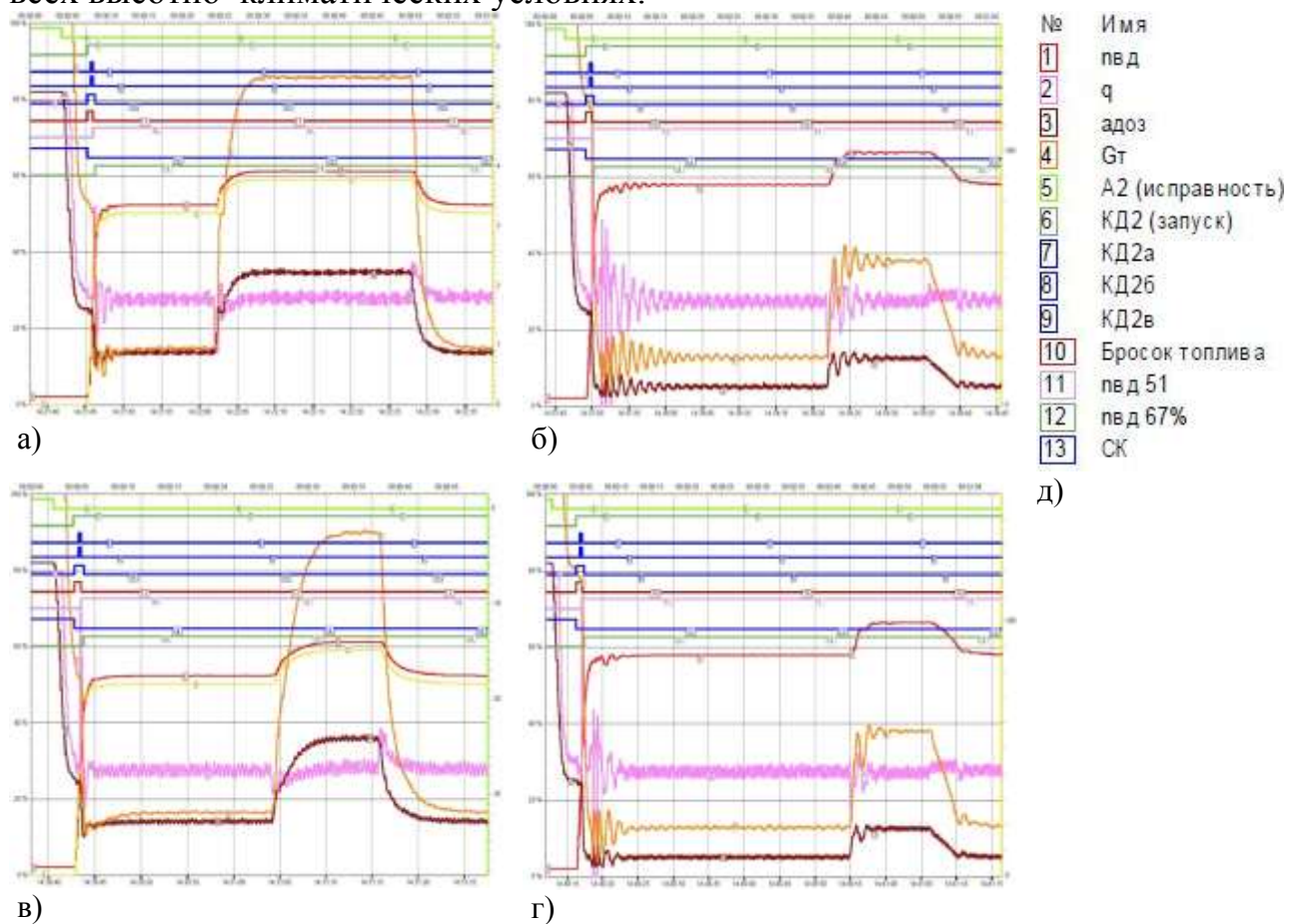


Рисунок 9 – Переходные процессы при работе регулятора $n_{вд}$

Пример переходного процесса работы АНР n_{60} приведен на рисунке 9, где ПИД-регулятор: а) на «земле», б) в полете, адаптивный нечеткий регулятор в) на «земле», г) в полете; д) – параметры контроля. Значения показателей качества переходных процессов работы ПИД-регулятора и АНР n_{60} приведены таблице 1.

Таблица 1

Характеристика	Режим	Нечеткий	ПИД-регулятор
Степень затухания	Земля	Колебаний нет	Колебаний нет
	Полет	0,024	0,012
Время регулирования, с	Земля	5	5
	Полет	10	13
Перерегулирование, %	Земля	0	0
	Полет	0,956	2,748

Разработаны программы, реализующие адаптивные нечеткие регуляторы. Программы загружены в электронные регуляторы. Проведены сравнительные натурные лабораторные испытания в составе электронных регуляторов на стендах-аналогах двигателя.

Использование результатов диссертационной работы при проектировании САУ ТРДД средней и малой размерности позволило обеспечить выполнение заданных технических требований по качеству управления в течение жизненного цикла работы двигателя. При этом применение результатов диссертационной работы позволило решить существенную проблему вероятной потери устойчивости замкнутой системы управления по ресурсу и обеспечить уменьшение времени переходных процессов регулирования на 15 %, увеличить запас устойчивости по амплитуде и фазе по сравнению с текущими показателями, обеспечить устойчивую работу системы управления гидроцилиндрами при увеличении коэффициента усиления замкнутой системы в 15 раз.

Результаты диссертационной работы используются также в учебном процессе в рамках программ магистратуры по направлению подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» для проведения лекционных и практических занятий, лабораторных работ, курсового проектирования.

Предложенные научные основы создания и исследования принципов построения и функционирования адаптивных нечетких регуляторов САУ ВРД с учетом требований систем жесткого реального времени нашли применение в дисциплине «Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени» программы магистратуры «Информационные технологии в проектировании систем реального времени». Результаты диссертационного исследования применены в рамках лабораторных практикумов в составе лабораторных стендов, реализованных в среде моделирования LabView фирмы National Instruments.

Основные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии сравнения	ПИД-регулятор	Адаптивный регулятор на базе сети <i>ANFIS</i>	Адаптивный нечеткий регулятор с адаптивным фильтром и гарантированной устойчивостью
Адаптивные свойства	нет	да	да
Возможность реализации во встроенных бортовых автоматических системах управления	да	нет	да
Возможность получения желаемого переходного процесса	ограничена	обеспечивается	обеспечивается
Полученные преимущества на рассмотренных примерах по сравнению с ПИД-регулятором	–	уменьшение величины заброса по регулируемому параметру в 2 раза, уменьшение времени переходного процесса в 3 раза по сравнению с ПИД-регулятором	уменьшение времени переходного процесса на 15%, устойчивая работа при увеличении коэффициента усиления в объекте регулирования в 15 раз

Заключение

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработан новый метод проектирования адаптивных нечетких регуляторов для систем управления с учетом требований к встроенным системам реального времени (работа в реальном времени, реализуемость в бортовой аппаратуре, автоматический режим работы и другие).

В результате анализа методов адаптации устройств САУ для ОУ с неполным математическим описанием на примере ВРД выбран метод адаптации с последовательным обучением. Выполнен синтез адаптивных устройств САУ ВРД, реализованных на основе специализированной сети *Anfis* и на основе оригинальных адаптивных нечетких регуляторов.

В диссертационной работе доказано, что адаптивные регуляторы, основанные на нечеткой логике (*fuzzy logic*) применимы для управления ВРД. Показано, что адаптивное нечеткое управление обеспечивает желаемый характер переходных процессов управления при изменении характеристик ОУ. Подтверждено, что выбранный алгоритм адаптации, обеспечивает исключение процедуры обучения адаптивного регулятора за счет подстройки его

коэффициентов усиления в реальном времени на каждом цикле работы встроенной системы управления.

2. Создан оригинальный метод синтеза адаптивных фильтров с целью улучшения качества управления с учетом изменения инерционности ОУ в разных режимах работы, обеспечивающий заданные фильтрующие свойства контуров управления.

В результате исследования инерционности ОУ подтверждено, что заданные фильтрующие свойства в замкнутой системе управления обеспечиваются по каждому параметру управления. Учет инерционности ОУ может быть реализован в системе управления в виде виртуального датчика, работающего в реальном времени. Сравнительный анализ работы контура температуры газа в камере сгорания с учетом инерционности ВРД по этому параметру показал, что время регулирования в переходном процессе на единичное возмущение по управлению уменьшилось на 15 %.

3. Разработан метод, обеспечивающий надежность функционирования устройств систем управления с гарантированной устойчивостью на основе применения адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

Разработанный метод позволяет гарантированно обеспечить устойчивость замкнутой системы управления, повысить точность поддержания параметров в заданных пределах, обеспечить заданное время и заданный характер переходных процессов. Замкнутая САУ ВРД на основе разработанных адаптивных нечетких регуляторов позволяет парировать значительные измеряемые и не измеряемые возмущающие воздействия за счет адаптивных свойств, без потери точности и устойчивости управления. Так при воздействии возмущений и/или изменении характеристик ВРД, при которых характер работы замкнутой САУ с ПИД-регулятором становится неустойчивым, адаптивный нечеткий регулятор позволяет не только устойчиво управлять ВРД, но и обеспечивать заданный характер переходного процесса.

Элементами САУ обеспечен гарантированный запас устойчивости по амплитуде и фазе. Выполнен синтез алгоритмов адаптивных нечетких регуляторов, обеспечивающих гарантированную устойчивость управления технологическими процессами, в том числе и при изменении коэффициента усиления ОУ в 15 раз.

4. Результаты исследования внедрены в процессы проектирования и реализации элементов САУ ВРД различного назначения и в учебный процесс Пермского национального исследовательского политехнического университета

Разработаны алгоритмы реализации регуляторов и программы, обеспечивающие ожидаемые параметры переходных процессов в замкнутой системе регулирования, состоящей из нечеткого регулятора и ВРД, не имеющего точного математического описания.

Разработан программный комплекс для математического моделирования АНР. Разработанный программный комплекс обеспечивает моделирование замкнутой САУ ВРД, а результаты моделирования подтверждают эффективность разработанных методов и предложенных алгоритмов.

В частности, технические решения, полученные при разработке АНР положения дозирующего устройства, позволяют создавать регуляторы устройств механизации ВРД (сервоприводы направляющих аппаратов компрессора, клапанов перепуска воздуха и др.) с гарантированным запасом устойчивости, а также регуляторы, предназначенные для позиционирования гидро и пневмоцилиндров в других областях техники.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

При дальнейших исследованиях по теме диссертации целесообразно обратиться к более глубокому анализу проблем интеллектуального управления в современной авиации.

Представляется целесообразным расширить исследование в области комбинированного управления с применением устройств ввода воздействия в контурах управления ВРД. Рассмотреть проблему адаптивного нечеткого управления ВРД с малоэмиссионными камерами сгорания, где малоэмиссионная камера сгорания представляет собой отдельный ОУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним

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. Нейронечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины 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, Н.Н. Матушкин, Ю.К. Титов, 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, А.А. Южаков, Ю.К. Титов // Электротехника, – 2018. – № 11. – С. 6–11.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus

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. – P. 622-625 (Scopus).

7. Titov, Yu.K. A Way to Design an Adaptive Fuzzy Controller for the Dispenser Position of an Air-Breathing Engine / Yu.N. Khizhayakov, A.A.

Патенты Российской Федерации

8. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2392468 «Способ управления расходом топлива на запуске газотурбинного двигателя»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин, С.В. Остапенко, Ю.Г. Шарифуллин// опубликовано: 20.06.2010 Бюл. № 17.

9. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2329388 «Способ защиты газотурбинного двигателя»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин// опубликовано: 20.07.2008 Бюл. № 20.

10. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение №2618171 «Способ управления авиационным газотурбинным двигателем на взлетном режиме при пожаре»/ Ю.К. Титов, Савенков Ю.С., Саженков А.Н.// опубликовано: 02.05.2017 Бюл. № 13.

11. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2468229 «Способ контроля системы управления газотурбинным двигателем»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин, С.В. Остапенко// опубликовано: 27.11.2012 Бюл. № 33.

12. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2472974 «Способ защиты газотурбинного двигателя»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин// опубликовано: 20.01.2013 Бюл. № 2.

13. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2472957 «Способ управления газотурбинным двигателем»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин// опубликовано: 20.01.2013 Бюл. № 2.

14. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2474713 «Способ защиты газотурбинного двигателя»/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин// опубликовано: 10.02.2013 Бюл. № 4.

15. Титов, Ю.К. Патент РФ на изобретение № 2482024 «Способ управления силовой установкой вертолета»/ Ю.К. Титов, П.И. Алексеев, Ю.П. Дудкин, В.А. Гладких, Г.В. Фомин, С.В. Остапенко, В. Н. Мельников, В. М. Кононыхин// опубликовано: 20.05.2013 Бюл. № 14.

16. 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.

17. 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.

Публикации в прочих изданиях, в том числе материалы конференций

18. Титов, Ю.К. А.С. СССР №1501627 «Устройство для управления направляющими аппаратами компрессора газотурбинного двигателя» / Ю.К. Титов, В. В. Бурдин, Т. С. Савинова, Г. В. Фомин// от 15.04.1989.

19. Титов, Ю.К. Алгоритм повышения качества контуров управления авиационным двигателем/ Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков// Электротехника. 2013. № 11. – С. 28–31.

20. Титов, Ю.К. Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков// Системы мониторинга и управления: сб. науч. тр. Перм. гос. техн. ун-та. – Пермь, 2008 – С. 144–152.

21. Титов, Ю.К. Методика проектирования нечеткого астатического регулятора напряжения СГ средней мощности/ Ю.К. Титов, Ю.Н. Хижняков// Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы 1-ой Всероссийской научно-технической интернет-конференции. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С.119–125.
22. Титов, Ю.К. Способы нейро-нечеткого управления частотой вращения силовой турбины турбовального двигателя/ Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков// Механика и процессы управления. Том 2. – Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. – М.: РАН, 2011. – С. 142–149.
23. Титов, Ю.К. Применение нечеткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя/ Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков// Итоги диссертационных исследований. Том 1. Материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2011. – С. 164–173.
24. Титов, Ю.К. Адаптивное нечеткое управление авиационным двигателем/ Ю.К. Титов, Ю.Н. Хижняков// Материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления», Челябинск, 2013. – С. 89–96.
25. Титов, Ю.К. Использование перспективных алгоритмов управления САУ для повышения надежности и точности регулирования. Адаптивное управление газотурбинного двигателя с применением нейро-нечетких алгоритмов/ Ю.К. Титов, Ю.Н. Хижняков// Материалы научно-технического совета по теме «Перспективные САУ ГТД. Направления развития, проблемы и пути их решения», Пермь, 2016. – С. 12.
26. Титов, Ю.К. Разработка адаптивного нейро-нечеткого регулятора частоты вращения вентилятора ТРДД./ Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков// ж-л «Известия ВУЗов. Электромеханика» №2, 2013. – С. 8.
27. Титов, Ю.К. Методы робастности в процедуре обнаружения и изоляции отказов датчиков на основе математической модели авиационного газотурбинного двигателя/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, Р.Г. Филиппенков// Сборник научных трудов «Системы мониторинга и управления», ПГТУ, Пермь, 2010. – С. 284–292.
28. Титов, Ю.К. Применение встроенной в регулятор математической модели двигателя ПС-90А2 в целях повышения контролепригодности системы автоматического управления/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков// Тезисы докладов XXVII Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 150-летию К.Э. Циолковского», Миасс, 2007. – С. 167–168.
29. Титов, Ю.К. Разработка алгоритма встроенной в регулятор адаптивной математической модели двигателя ПС-90А2, основанной на применении нейронных сетей/ Ю.К. Титов, Ю.П. Дудкин, Р.Г. Филиппенков, Ю.Н. Хижняков// Наука и технологии, труды XXVII Российской школы, М., изд-во: РАН, 2007. – С. 193–194.
30. Титов, Ю.К. Способы адаптивного нейро-нечеткого управления частотой вращения силовой турбины турбовального двигателя./ Ю.К. Титов, Р.Г. Филиппенков // Материалы 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», 2012. – С.227–228.
31. Титов, Ю.К. Нейронное управление силовой турбиной/ Ю.К. Титов, Ю.Н. Хижняков// Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, 2018. – С. 317.