

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматики и телемеханики

УДК 621.311.23:629.12

На правах рукописи



Титов Юрий Константинович

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

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Хижняков Юрий Николаевич

Пермь 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Анализ современного состояния управления ВРД.....	13
1.1 Анализ элементов систем управления ВРД как объекта исследования....	13
1.1.1 Элементы системы управления типа «ГАЗ» и ее модификации.....	17
1.1.2 Элементы системы управления типа «ГАЗ» с УВВ	19
1.1.3 Элементы системы связанного управления	21
1.1.4 Элементы системы управления типа «ШАГ» и ее модификации.....	22
1.1.5 Элементы системы управления типа «ШАГ» с УВВ	24
1.1.6 Элементы системы связанного управления «ГАЗ - ШАГ»	28
1.2 Обзор существующих подходов к синтезу регуляторов и фильтров	30
1.3 Постановка задачи исследования систем управления с гарантированной устойчивостью.....	38
1.4 Выводы по первой главе	41
2. Метод анализа и синтез адаптивных нечетких регуляторов.....	42
2.1 Модели построения адаптивных нечетких регуляторов.....	43
2.2 Синтез адаптивных нечетких регуляторов на основе специализированной сети <i>Anfis</i>	49
2.2.1 Метод построения нечеткого регулятора.....	49
2.2.2 Результаты исследования адаптивного нечеткого регулятора частоты на базе специализированной сети <i>Anfis</i>	55
2.3 Новый авторский метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов.	61
2.3.1 Методы адаптации фаззификатора.....	61
2.3.2 Пример синтеза адаптивного нечеткого регулятора с применением адаптивного фаззификатора для обобщенной модели № 2	74
2.3.3 Анализ функционирования адаптивного нечеткого регулятора на основе адаптивного фаззификатора и дефаззификатора	77
2.3.4 Анализ адаптивных свойств адаптивного нечеткого регулятора параметров ВРД	81
2.4 Пример синтеза адаптивного нечеткого регулятора позиционирования дозатора топлива	84
2.4.1 Синтез адаптивного нечеткого регулятора расхода топлива в замкнутой системе управления в условиях априорной определенности параметров объекта управления.....	84

2.4.2	Анализ работы адаптивного нечеткого регулятора расхода топлива в замкнутой системе управления в условиях априорной определенности параметров объекта управления	90
2.5	Инженерный метод проектирования адаптивных нечетких регуляторов	92
2.6	Выводы по второй главе	94
3.	Метод проектирования систем автоматического управления с учетом обеспечения гарантированного запаса устойчивости систем управления двигателями	97
3.1	Метод синтеза адаптивных фильтров на основе инерционности объекта управления	99
3.2	Пример количественной оценки инерционности двигателя по температуре газа и синтез адаптивного фильтра по результатам этой оценки	103
3.3	Совместная работа адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров в контурах управления параметрами ВРД	113
3.4	Разработка метода обеспечения гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления	117
3.5	Пример синтеза настроек регулятора с гарантированной устойчивостью на основе предложенного метода	122
3.6	Исследование гарантированной устойчивости адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров в условиях неопределенности параметров объекта управления	124
3.7	Выводы по третьей главе	129
4.	Внедрение адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью	130
4.1	Внедрение результатов диссертационной работы в производственный процесс	136
4.2	Результаты промышленной апробации и перспективы использования результатов диссертационной работы в производственном процессе	138
4.3	Внедрение результатов диссертационной работы в образовательный процесс	146
4.4	Выводы по четвертой главе	146

5. Заключение	148
Список сокращений и условных обозначений	151
Список литературы	152
Приложения	166
Приложение А	167
Приложение Б.....	169
Приложение В	175
Приложение Г	182
Приложение Д	188
Приложение Е.....	195
Приложение Ж	200

Введение

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.

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.

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.

Все перечисленное обуславливает актуальность проведения теоретических исследований в области адаптивного нечеткого управления ВРД с гарантированным запасом устойчивости в условиях неполного математического описания ВРД как объекта управления и разработки адаптивных фильтров в контурах управления, свойства которых зависят от изменения инерционных свойств ВРД как объекта управления.

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, обеспе-

чивающих 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 требований к встроенным системам реального времени.

2. Разработать метод синтеза адаптивных фильтров с целью улучшения качества управления с учетом изменения инерционности объекта управления 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.

Области 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 объекта управления, в условиях неопределенности изменения характеристик объекта управления на основе применения адаптивных элементов систем управления 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 используются при создании систем управления ВРД на предприятии АО «ОДК-СТАР» (г. Пермь) при создании систем управления 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 г., Москва), III Всероссийский конкурс молодых ученых (2011 г., Москва), 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012 (2012 г., Москва), научно-практическая конференция «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (2013 г., 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 г., Пермь), 14 Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (2017 г., Пермь), Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (2018 г., 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 [53, 54, 62] заключается в разработке и исследовании в качестве элементов систем управления ВРД адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

В работе [55] автор предложил исследовать и реализовать нейронечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины ТВД на базе Anfis-сети.

В статье [58] автором предложено проектировать системы управления с гарантированным запасом устойчивости, обеспечивающим устойчивую работу

замкнутой системы управления при изменении характеристик объекта управления 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.

1. Анализ современного состояния управления ВРД

1.1 Анализ элементов систем управления ВРД как объекта исследования

Рассмотрим элементы системы управления ВРД: регуляторы, фильтры; способы их реализации, достоинства и недостатки. В состав системы управления также входят исполнительные механизмы дозирования топлива, исполнительные механизмы механизации двигателя (гидроцилиндры) и объект управления (ВРД).

ВРД классифицируются как турбовальные (ТВаД), турбовинтовые (ТВД) и турбореактивные двухконтурные (ТРДД) в зависимости от области их применения.

ТВаД устанавливаются на вертолетах, на приводах генераторов автономных электростанций и нагнетательных колес газоперекачивающих агрегатов. В ТВаД силовая турбина через редуктор механически соединена с ротором несущего винта вертолета, либо с ротором бесщеточного синхронного генератора электростанции, либо нагнетательного колеса газоперекачивающего агрегата.

ТВД устанавливаются на пассажирские самолеты местных воздушных линий и транспортные самолеты. В ТВД силовая турбина через редуктор механически соединена с воздушным винтом изменяемого шага для создания тяги самолета.

ТРДД устанавливаются на магистральные пассажирские самолеты и транспортные самолеты. В ТРДД турбина низкого давления (силовая турбина) вращает вентилятор, который создает тягу самолета.

В системах управления ТВД реализуется управление двумя объектами регулирования – двигателем и воздушным винтом (ВВ) изменяемого шага. Входными сигналами для объекта управления являются расход топлива двигателя G_t и положение лопастей ВВ φ . Выходными сигналами – частота вращения силовой турбины $n_{ст}$ и мощность $N_{в}$, потребляемая ВВ, как показано на рис.1.1.

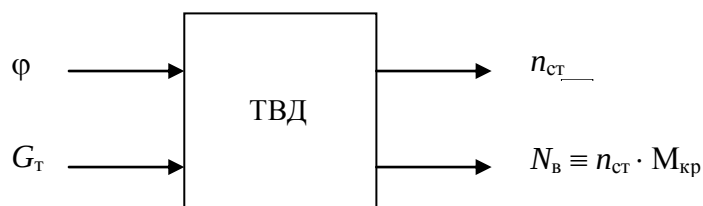


Рис.1.1. Входы φ , G_T и выходы $n_{ст}$, N_B ТВД как объекта управления, где φ угол установки лопастей ВВ, $n_{ст}$ – частота вращения силовой турбины, G_T – расход топлива, N_B – мощность, потребляемая ВВ, $M_{кр}$ – крутящий момент

Замкнутая система управления ТВД (рис. 1.2) содержит в своем составе следующие элементы системы управления: сам объект управления (двигатель с силовой турбиной (СТ), приводящий в движение воздушный винт), регуляторы двигателя и ВВ с соответствующими корректирующими звеньями и фильтрами, датчики частоты вращения и крутящего момента СТ, регулятор расхода топлива (дозатор) и исполнительные органы управления углом поворота лопастей ВВ и расходом топлива G_T .

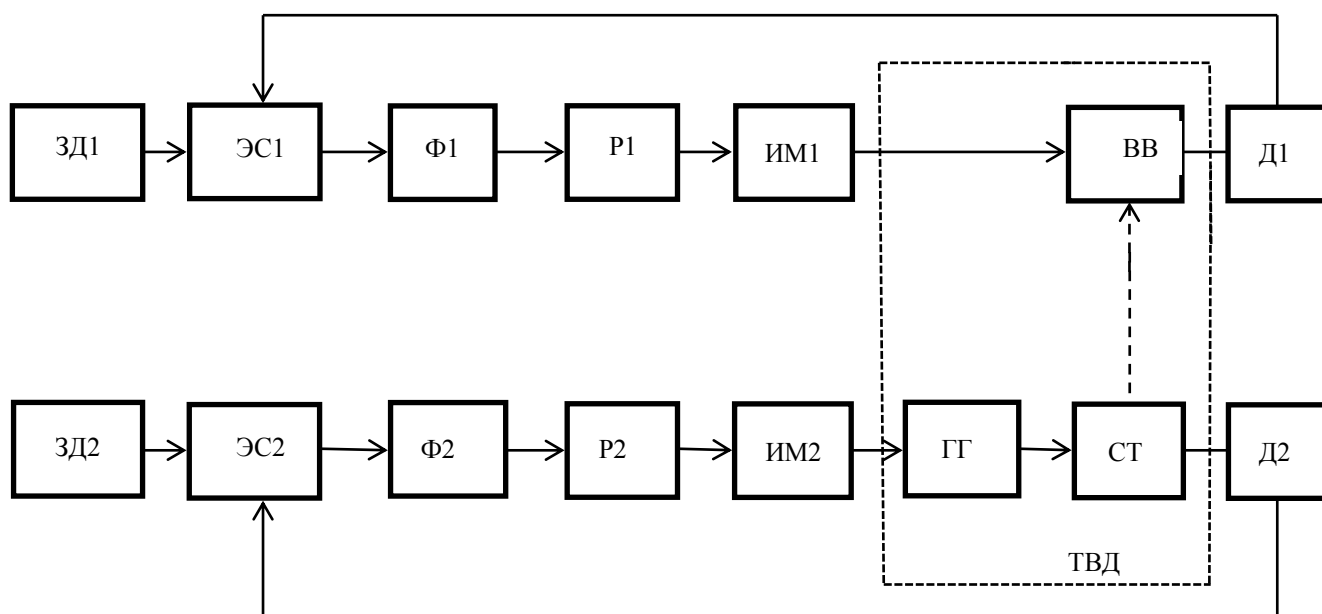


Рис.1.2 Замкнутая система управления турбовинтового двигателя где элементами системы управления являются ГГ - газогенератор, СТ - силовая турбина, ВВ - воздушный винт, ЗД i – задатчики режима, ЭС i – элементы сравнения, Р i – регуляторы, Ф i – фильтры, Д i – датчики, ИМ i – исполнительные механизмы; механическая связь (пунктирная линия со стрелкой)

Нагрузкой для ТВД является потребляемая мощность ВВ $N_{ВВ}$, которая может изменяться за счет изменения угла поворота φ рабочих лопастей ВВ:

$$N_{\text{вв}} = f(\varphi, n_{\text{ст}}, V) \quad (1.1)$$

Взаимодействие силовой турбины и ВВ выражается уравнением динамики:

$$J n_{\text{ст}} \frac{dn_{\text{ст}}}{dt} = N_{\text{с}} - N_{\text{вв}}. \quad (1.2)$$

Регулирование располагаемой мощности двигателя $N_{\text{с}}$, потребляемой ВВ, определяется изменением расхода топлива $G_{\text{т}}$. Следовательно, $G_{\text{т}}$ и φ есть управляющие воздействия, а $N_{\text{с}}$ и $n_{\text{ст}}$ соответственно регулируемые параметры (см. рис.1.1).

В ТВД существующие системы регулирования частоты вращения СТ $n_{\text{ст}}$ реализуются на базе одноконтурной системы управления с отрицательной жесткой обратной связью, в которую включены элементы: регулятор угла поворота рабочих лопастей ВВ (P_{φ}) и регулятор расхода топлива (P_G). При введении в процесс управления регулятором расхода топлива P_G ограничителей по параметрам двигателя, работа регулятора $n_{\text{ст}}$ может быть прервана работой селектора. Селектор отключает регулятор поддержания частоты вращения $n_{\text{ст}}$ при вступлении в работу ограничителей температуры газов в камере сгорания, давления воздуха за компрессором, частоты вращения турбокомпрессора и других переменных [33, 48, 75].

Основной задачей системы управления силовой установкой самолета на базе ТВД является создание тяги воздушным винтом в соответствии с положением рычага управления двигателем.

Все многообразие существующих систем управления турбовальными и турбовинтовыми двигателями может быть сведено к системам управления «ГАЗ» (α -схема) и ее модификациям применительно к самолетам с воздушными винтами, система управления «ШАГ» (β -схема) и ее модификациям применительно к вертолетам и наземным энергетическим установкам [48, 78], а также к связанной системе «ШАГ+ГАЗ».

На рис. 1.3 приведена классификация систем управления ВРД.

Исходя из уравнения динамики силовой турбины (1.2) при равенстве генерируемой и потребляемой мощностей на валу свободной турбины величина

$$\frac{dn_{cr}}{dt} = 0.$$

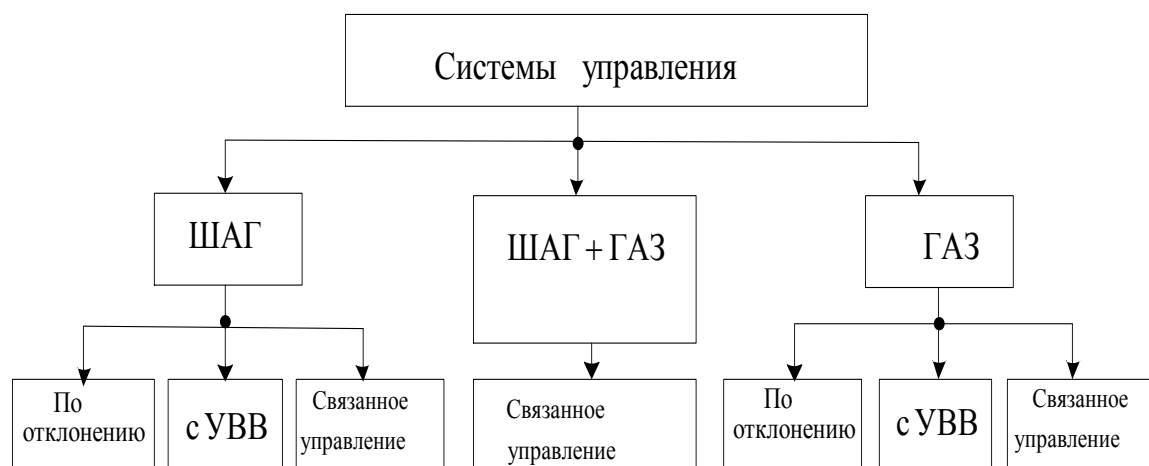


Рис.1.3. Классификация систем управления ВРД

При изменении одной из мощностей, генерируемой или потребляемой, частота вращения силовой турбины начинает изменяться. В зависимости от того, какая мощность начинает изменяться первой при изменении режима работы системы управления, частота вращения силовой турбины в этот первоначальный момент может либо уменьшаться, либо увеличиваться.

В системах управления «ГАЗ» задатчик режима изменяет генерируемую мощность на силовой турбине за счет изменения режима работы газогенератора. Задатчик режима в системе «ГАЗ» реализуется регулятором частоты вращения ротора газогенератора или регулятором мощности двигателя, работающим по прямому замеру крутящего момента на валу силовой турбины.

В системах управления «ШАГ» задатчик режима изменяет потребляемую мощность на силовой турбине за счет изменения нагрузки от воздушного (несущего) винта или за счет увеличения потребления электроэнергии. Задатчик режима в системе «ШАГ» реализуется рычагом/регулятором, изменяющим угол атаки несущего/воздушного винта соответственно или регулятором на-

грузки в промышленных установках. Особенности различных систем управления ВРД, реализуемые в элементах систем управления, связаны с различиями в объектах управления и рассмотрены ниже.

1.1.1 Элементы системы управления типа «ГАЗ» и ее модификации

Рассмотрим элементы системы управления типа «ГАЗ», в которой реализован принцип регулирования по отклонению [77].

В системе управления «ГАЗ» рычаг управления двигателем как задатчик режима работы, через соответствующий регулятор воздействует на величину расхода топлива G_T , изменяя его. При этом угол установки лопастей φ изменяется автоматическим регулятором положения лопастей ВВ P_φ , который поддерживает заданную частоту вращения силовой турбины $n_{ст}$.

Элементы системы управления «ГАЗ» для объекта управления (двигатель с силовой турбиной), приведены на рис. 1.4.

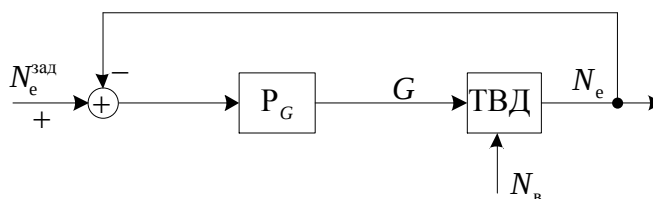


Рис.1.4. Элементы системы управления «ГАЗ», где ТВД – объект управления, двигатель с силовой турбиной, P_G – регулятор расхода топлива, $N_{езд}$ – мощность двигателя заданная, G – расход топлива, N_e – мощность, генерируемая двигателем, $N_в$ – мощность, потребляемая ВВ

Регулятор расхода топлива в системе управления «ГАЗ», в отличие от системы управления «ШАГ», содержит в своем составе корректирующие звенья и фильтры, обеспечивающие управление мощностью двигателя.

Элементы системы управления «ГАЗ» для объекта управления (воздушный винт), приведены на рис. 1.5.

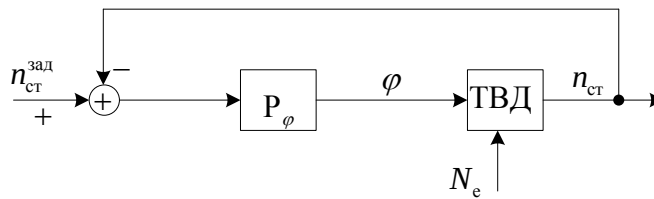


Рис.1.5. Элементы системы управления «ГАЗ», где ТВД – объект управления – ВВ, P_ϕ – регулятор положения лопастей воздушного винта, $n_{ст}^{зад}$ – частота вращения силовой турбины заданная, ϕ угол установки лопастей ВВ, $n_{ст}$ – частота вращения силовой турбины.

Регулятор положения лопастей воздушного винта в системе управления «ГАЗ», содержит в своем составе корректирующие звенья и фильтры, обеспечивающие управление частотой вращения силовой турбины путем изменения потребляемой мощности за счет изменения угла атаки лопастей ВВ.

При работе системы управления «ГАЗ» по отклонению, системы управления двигателем и ВВ связаны между собой жесткой механической связью (см. рис. 1.2).

Процесс нарастания тяги двигателя с режима малого газа до максимального режима сопровождается увеличением частоты вращения $n_{ст}$ вследствие опережающего увеличения располагаемой мощности на силовой турбине по отношению к потребляемой мощности воздушного винта ($N_e > N_v$). Регулятор P_ϕ , парируя раскрутку, увеличивает через исполнительный механизм угол установки ϕ лопастей ВВ. Вследствие имеющегося дисбаланса вырабатываемой и потребляемой мощностей на переменных режимах работы двигателя приемистость двигателя характеризуется забросом частоты вращения $n_{ст}$, а сброс режима работы двигателя – с провалом частоты вращения $n_{ст}$.

Достоинствами системы управления «ГАЗ» являются:

- компенсация любых возмущений, действующих в системе, включая основное возмущение N_e ;
- действие ограничителей параметров двигателя не влияет на работу контура управления по частоте вращения $n_{ст}$, поддерживаемой регулятором положения лопастей ВВ в соответствии с заданным законом управления.

Система управления двигателем типа «ГАЗ» применяется в системе управления маршевой силовой установкой самолета.

Недостатки системы управления «ГАЗ»:

- регулирование частоты вращения $n_{ст}$ происходит с запаздыванием вследствие реализованного в контуре управления принципа регулирования по отклонению;
- существует связь между фильтрующими свойствами САУ и ее устойчивостью.

С целью устранения связи между фильтрующими свойствами и устойчивостью САУ в ее структуру вводится устройство ввода воздействия (УВВ) и/или фильтры в качестве корректирующих звеньев. С целью устранения связи между коэффициентами усиления корректирующих звеньев и устойчивостью САУ при расчете ее коэффициентов обеспечивается расчетный запас устойчивости.

1.1.2 Элементы системы управления типа «ГАЗ» с УВВ

Рассмотрим элементы системы управления «ГАЗ» с УВВ, реализующей комбинированный принцип регулирования, приведенной на рис.1.6.

В системе управления «ГАЗ» с УВВ, в отличие от системы управления «ГАЗ», дополнительно формируется сигнал управления с УВВ, который подается на вход регулятора P_ϕ и компенсирует влияние N_e на $n_{ст}$. Дополнительно регулятор P_ϕ парирует влияние неконтролируемых возмущающих воздействий в системе. Введение УВВ в систему управления «ГАЗ» минимизирует дисбаланс генерируемой и потребляемой мощностей на переменных режимах работы двигателя, уменьшается заброс частоты вращения $n_{ст}$ при приемистости двигателя и провал частоты вращения $n_{ст}$ при сбросе режима работы двигателя.

К достоинствам системы управления «ГАЗ» с УВВ следует отнести:

- высокое быстродействие алгоритма компенсации по отработке основного возмущения N_e ;
- универсальность алгоритмов парирования неконтролируемых возмущений;

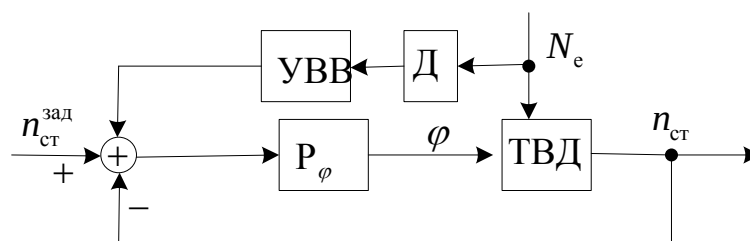


Рис.1.6. Элементы комбинированной системы управления «ГАЗ» с УВВ: P_ϕ – регулятор положения лопастей воздушного винта; Д – датчик, измеряющий генерируемую мощность двигателя; УВВ – устройство ввода воздействия

- отсутствие влияния алгоритмов ограничения параметров двигателя на работу контура частоты вращения $n_{ст}$, поддерживаемую в соответствии с заданным законом регулятором положения лопастей ВВ;

- отсутствие связи между устойчивостью и фильтрующими свойствами элементов системы управления вследствие применения в алгоритмах управления комбинированного принципа регулирования.

Недостатками системы управления «ГАЗ» с УВВ являются:

- для обеспечения динамической точности регулирования необходима реализация УВВ;

- для реализации УВВ необходимо применение датчика, измеряющего крутящий момент двигателя для расчета генерируемой мощности двигателя.

- при работе регуляторов угла поворота рабочих лопастей воздушного винта ВВ (P_ϕ) и расхода топлива (P_G), работающих каждый по своему закону управления возможен дисбаланс мощностей на валу силовой турбины.

В существующей практике для устранения дисбаланса мощностей на валу силовой турбины производится введение в систему управления элементов связанного управления.

1.1.3 Элементы системы связанного управления

Снижение дисбаланса мощностей на валу силовой турбины турбовинтового двигателя можно добиться построением связанной САУ с дополнительным контуром управления мощностью, показанной на рис.1.7.

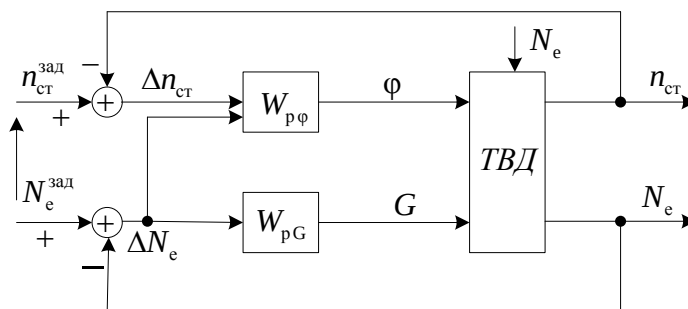


Рис.1.7. Элементы модифицированной системы управления связанно-го управления «ГАЗ», где

$W_{рφ}$ – передаточная функция регулятора по контуру управления положением лопастей винта;
 $W_{рG}$ – передаточная функция регулятора по контуру управления расходом топлива в двигателе;

$\Delta n_{ст}$ – ошибка регулирования по параметру $n_{ст}$; ΔN_e – ошибка регулирования по параметру N_e

Регулятор расхода топлива и регулятор управления положением лопастей винта в системе связанного управления содержат в своем составе корректирующие звенья и фильтры.

В модифицированной системе связанного управления «ГАЗ» рычаг управления контура мощности двигателя через соответствующий регулятор воздействует на величину расхода топлива G_T , изменяя его. Угол установки лопастей ϕ изменяется автоматическим регулятором положения лопастей ВВ P_ϕ , который поддерживает заданную частоту вращения силовой турбины $n_{ст}$.

На установившемся режиме работы двигателя частота вращения $n_{ст}$ поддерживается постоянной. При увеличении тяги двигателя с режима малого газа до максимального режима частота вращения $n_{ст}$ увеличивается вследствие опережающего роста располагаемой мощности на силовой турбине над потребляемой мощностью воздушного винта ($N_e > N_B$). Регулятор P_ϕ , парируя раскрутку, увеличивает с помощью исполнительного механизма угол установки ϕ лопастей ВВ. Вследствие имеющегося дисбаланса вырабатываемой и потребляемой

мощностей на переменных режимах работы двигателя приемистость двигателя характеризуется наличием заброса частоты вращения $n_{ст}$, а сброс режима работы двигателя – провалом частоты вращения $n_{ст}$. Однако дополнительный сигнал, подаваемый на регулятор установки лопастей от контура мощности с опережением, парирует возможный дисбаланс мощностей и снижает заброс частоты вращения свободной турбины.

Приведенные выше варианты построения системы управления «ГАЗ» направлены на снижение дисбаланса мощностей на валу силовой турбины на переходных режимах ее работы с целью более точного управления частотой вращения силовой турбины.

Одним из дальнейших путей совершенствования элементов системы управления «ГАЗ» предложено введение в систему управления адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров, обеспечивающих гарантированную устойчивость при вариациях параметров объекта управления.

1.1.4 Элементы системы управления типа «ШАГ» и ее модификации

Далее рассмотрим элементы системы управления типа «ШАГ» и ее модификации.

Элементы системы управления «ШАГ» приведены на рис.1.8 [5, 77].

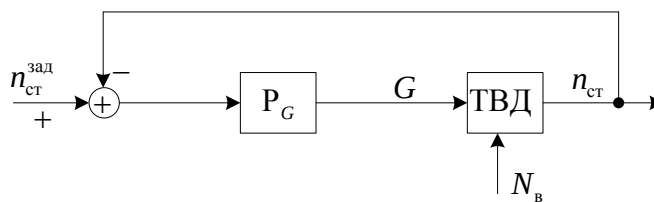


Рис.1.8. Элементы системы управления типа «ШАГ», где объект регулирования – двигатель с силовой турбиной, P_G – регулятор расхода топлива

Элементы системы управления типа «ШАГ» применяются в силовых установках вертолетов, газоперекачивающих агрегатов и электростанций с двигателями, имеющими силовую турбину [77].

Регулятор расхода топлива в системе управления «ШАГ», в отличие от системы управления «ГАЗ», содержит в своем составе корректирующие звенья и фильтры, обеспечивающие управление частотой вращения силовой турбины.

В системе управления «ШАГ» пилотом изменяется нагрузка от рычага общего шага несущего винта вертолета, который с помощью исполнительного механизма воздействует на угол установки лопастей $\varphi_{НВ}$, а расход топлива G_T изменяется автоматически регулятором P_G , поддерживающим заданную постоянную частоту вращения силовой турбины. Перевод двигателя на максимальный режим работы осуществляется увеличением нагрузки на силовую турбину.

На установившемся режиме работы двигателя частота вращения $n_{ст}$ поддерживается постоянной. При увеличении мощности двигателя с режима малого газа до максимального режима частота вращения $n_{ст}$ уменьшается вследствие опережающего роста потребляемой на силовой турбине мощности работы по отношению к генерируемой (располагаемой) мощности двигателя ($N_b > N_e$). Регулятор P_G , паряруя снижение частоты вращения $n_{ст}$, увеличивает расход топлива двигателя с помощью исполнительного механизма. Вследствие имеющегося дисбаланса потребляемой и вырабатываемой мощностей на переменных режимах работы двигателя, приемистость двигателя идет с провалом частоты вращения $n_{ст}$ ниже заданного значения частоты вращения, а сброс режима работы двигателя – с забросом частоты вращения $n_{ст}$.

Достоинства системы управления «ШАГ»:

- производится компенсация любых возмущений, включая и основное возмущение N_e ;
- применяется схема управления, предпочтительная для объектов управления со стабилизацией частоты вращения.

Недостатки системы управления «ШАГ»:

- регулирование частоты вращения $n_{ст}$ производится с запаздыванием вследствие реализованного в системе управления принципа регулирования по отклонению;

– управление расходом топлива в функции $G_T = f(\Delta n_{ст})$ может быть прервано работой алгоритма селектирования, который отключает регулятор поддержания частоты вращения $n_{ст}$ при вступлении в работу ограничителей параметров двигателя, что приведет к разрыву связей в системе управления по параметру $n_{ст}$;

– существует связь между фильтрующими свойствами системы управления и ее устойчивостью.

С целью устранения связи между фильтрующими свойствами САУ и ее устойчивостью в качестве элемента системы управления вводится устройство ввода воздействия (например, датчик положения общего шага несущего винта вертолета) и в качестве корректирующих звеньев могут быть применены фильтры.

С целью устранения связи между коэффициентами усиления корректирующих звеньев САУ и устойчивостью САУ при расчете ее коэффициентов обеспечивается расчетный запас устойчивости.

1.1.5 Элементы системы управления типа «ШАГ» с УВВ

Рассмотрим элементы системы управления «ШАГ» с УВВ, которая приведена на рис.1. 9.

В системе управления «ШАГ» сигнал от рычага общего шага несущего винта вертолета с помощью исполнительного механизма воздействует на угол φ установки лопастей НВ и изменяет частоту вращения силовой турбины. При этом расход топлива G_T изменяется автоматически с помощью регулятора расхода топлива P_G , поддерживающего заданную частоту вращения силовой турбины. Перевод двигателя на максимальный режим работы осуществляется посредством увеличения сигнала нагрузки (угла установки лопастей φ НВ).

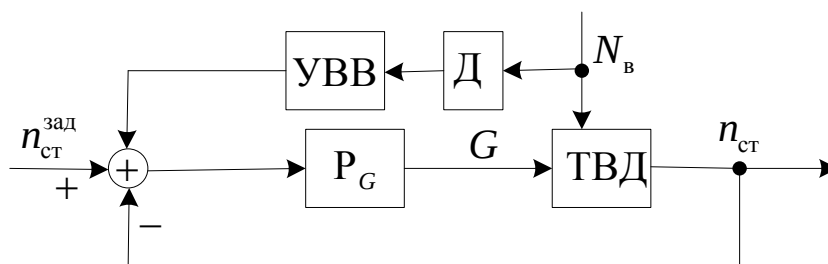


Рис.1.9. Элементы комбинированной системы управления «ШАГ» с УВВ, где P_G – регулятор по контуру управления расходом топлива в двигатель; Д – датчик, измеряющий потребляемую мощность двигателя; УВВ – устройство ввода воздействия

Для компенсации влияния изменения N_B на $n_{ст}$ дополнительно в систему управления («ШАГ» с УВВ) вводится сигнал управления с УВВ, который подается на вход регулятора P_G . При этом регулятор расхода топлива P_G парирует влияние неконтролируемых возмущающих воздействий в системе на частоту вращения $n_{ст}$.

Введение элемента УВВ в систему управления «ШАГ» минимизирует дисбаланс между потребляемой и генерируемой мощностями на переменных режимах работы двигателя. При этом уменьшается провал частоты вращения $n_{ст}$ при приемистости двигателя и заброс частоты вращения $n_{ст}$ при сбросе режима работы двигателя.

Достоинства системы управления «ШАГ» с УВВ:

- высокое быстродействие отработки по основному возмущению N_B ;
- универсальность парирования неконтролируемых возмущений;
- уменьшение зависимости устойчивости системы управления от ее фильтрующих свойств, которое обеспечивается выбором параметров регуляторов и фильтров при проектировании системы.

Инвариантность устойчивости системы и ее фильтрующих свойств обеспечивается введением корректирующих звеньев с адаптивными фильтрами.

Недостатки системы управления «ШАГ» с УВВ:

- при вступлении в работу ограничителей по параметрам двигателя возможно прекращение управления частотой вращения силовой турбины $n_{ст}$ и накопление ошибки регулирования;
- для повышения динамической точности регулирования необходима реализация УВВ;
- для реализации УВВ необходима установка датчика угла φ ;
- при изменении нагрузки двигателя возможен дисбаланс мощностей на валу силовой турбины.

Для устранения дисбаланса мощностей на валу силовой турбины возможно применение связанного управления, показанного на рис. 1.10.

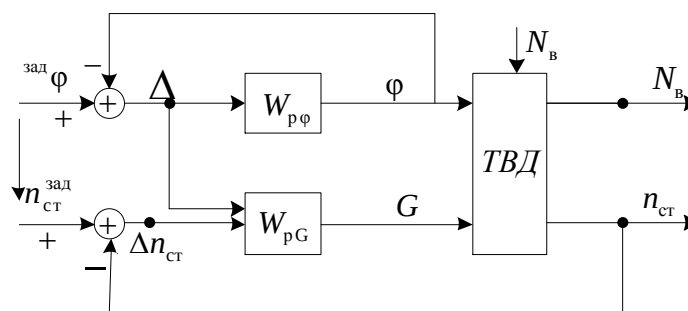


Рис.1.10. Модифицированная система связанного управления «ШАГ», где $\varphi^{\text{зад}}$ – положение лопастей воздушного винта заданное; Δ – ошибка регулирования по параметру φ .

Модифицированная система связанного управления реализуется для турбовинтового двигателя на определенных режимах его работы, например на режиме «тихого» руления самолета.

В модифицированной системе связанного управления «ШАГ» с помощью рычага поворота задается новый угол лопастей ВВ, который увеличивает мощность ВВ. При текущей генерируемой мощности ТВД наблюдается дисбаланс и провал частоты вращения свободной турбины. С целью снижения дисбаланса в регулятор расхода топлива в камеру сгорания ТВД вводится корректирующий сигнал, пропорциональный ошибке регулирования положения лопастей ВВ.

Дополнительно введенный сигнал на регулятор расхода топлива в камеру сгорания ТВД с опережением парирует возможный дисбаланс между располагаемой и потребляемой мощностями и снижает провал частоты вращения свободной турбины.

Одним из дальнейших путей совершенствования элементов системы управления «ШАГ» в работе предложено введение в систему управления регулятора на базе специализированной сети *Anfis*. Система управления со специализированной сетью *Anfis* может быть применена в наземных промышленных энергетических установках. Применение специализированной сети *Anfis* позволяет существенно повысить качество управления за счет уменьшения времени переходного процесса и уменьшения величины отклонения частоты вращения силовой турбины двигателя от частоты вращения на установившемся режиме при изменении нагрузки.

Отклонениями параметров двигателя в переходных режимах работы двигателя при управлении системой «ГАЗ» или системой управления «ШАГ» принципиально можно выполнить баланс между генерируемой и потребляемой мощностями на валу силовой турбины.

Это связано с тем, что изменение второго управляющего воздействия в каждой из систем управления происходит только после появления отклонения частоты вращения силовой турбины от заданного значения. Это приводит либо к повышению температуры газа и снижению запаса устойчивости компрессора (β -схема), либо к повышению крутящего момента на валу ВВ и снижению эффективности работы ВВ (α -схема). Не допустить возникновения дисбаланса мощностей на валу силовой турбины при больших возмущениях возможно при применении связанной системы управления «ГАЗ-ШАГ», функционирование элементов которой предусматривает одновременное изменение обоих управляющих воздействий в каждой из систем управления.

1.1.6 Элементы системы связанного управления «ГАЗ - ШАГ»

Анализ систем управления «ГАЗ» и «ШАГ» (α - и β - схем) с целью сравнительной оценки качества управления для различных режимов работы ВРД показал, что значительного преимущества какой-либо существующей системы управления двигателем не наблюдается [48, 77]. Под качеством управления при этом понимается динамическая точность управления и апериодический или колебательный характер переходного процесса.

Одна из модификаций система управления «ГАЗ-ШАГ», система управления двигателями «ШАГ-ГАЗ» реализована на российских вертолетах. Поскольку на рычаге общего шага несущего винта вертолета имеется ручка газа, пилот, загружая винт рычагом общего шага, этим же рычагом увеличивает режим работы двигателя и при этом имеет возможность одновременно скорректировать режим работы двигателя, поворачивая ручку газа на рычаге общего шага.

В полностью автоматических системах соответствующими регуляторами производится изменение φ и G_T согласно реализуемой в различных режимах полета функции $x_G = f(x_\varphi)$ при условии $n_{CT} = \text{const}$, что требует сложных вычислений [1]. Решение задачи упрощается, если в алгоритмах управления реализуется зависимость:

$$px_G = - \frac{K_{N\varphi}}{K_{NG}} px_\varphi ,$$

где px_G - передаточная функция системы управления, регулирующей генерируемую мощность газогенератора путем изменения расхода топлива, должна соответствовать передаточной функции px_φ системы управления, регулирующей потребляемую мощность путем изменения нагрузки на силовой турбине с учетом величин коэффициентов влияния расхода топлива на генерируемую мощность и изменения нагрузки на потребляемую мощность.

Недостатком данной системы управления «ГАЗ-ШАГ» является существенное влияние помех на работу САУ, что обуславливает высокие требования к

помехозащищенности системы. В дальнейшем рассмотрим повышение помехозащищенности контуров управления ТВД за счет включения адаптивных фильтров.

С целью улучшения динамических характеристик в существующих системах «ГАЗ» и «ШАГ» применяется опережающее регулирование по основным возмущающим воздействиям, требующее использование элементов связанного регулирования в системе управления.

На рис.1.11 показаны элементы модифицированной системы связанного управления «ГАЗ-ШАГ».

Дополнительно введенная связь по $\Delta n_{ст}$ парирует провалы $n_{ст}$. Дополнительно введенная связь по ΔN_e парирует забросы $n_{ст}$. Дополнительно введенные связи по ΔN_e и $\Delta n_{ст}$ (см. рис.1.10) минимизируют дисбаланс мощностей на валу силовой турбины, повышая при этом динамическую точность контура управления частотой вращения $n_{ст}$. Общим для всех реализуемых в современной практике вариантов построения связанных САУ турбовинтового двигателя является отключение контура управления частотой вращения $n_{ст}$ селектором контуров управления при вступлении в работу ограничителей параметров двигателя (температура, давление, частота вращения ротора газогенератора и другие).

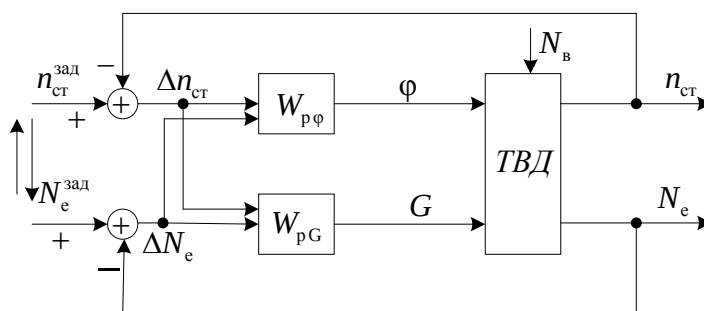


Рис.1.11. Модифицированная система связанного управления «ГАЗ-ШАГ»

В настоящем разделе рассмотрены варианты структурных схем систем управления, в которых повышение качества управления рассматривается с точ-

ки зрения оптимизации связей между элементами системы управления, а регуляторы и объекты управления представлены «черными ящиками».

Далее рассмотрим синтез элементов системы (классических ПИД-регуляторов и фильтров), входящих в системы управления, описанные выше и намечены пути дальнейшего совершенствования элементов системы управления, рассматриваемые в работе.

1.2 Обзор существующих подходов к синтезу регуляторов и фильтров

Современное развитие газотурбинного двигателестроения характеризуется совершенствованием двигателей с целью достижения высоких значений удельных параметров [71, 74, 76]. Высокие удельные параметры двигателя как тепловой машины достигаются за счет повышения частоты вращения, давления и температуры. При этом материалы, из которых изготовлен двигатель, работают в условиях, близких к их предельным характеристикам. В связи с этим задачи повышения качества и точности управления актуализируются [72].

Особое место среди современных направлений развития газотурбинного двигателестроения занимают вопросы совершенствования элементов систем управления двигателей [1, 2, 14, 15, 48, 93, 94].

В гидромеханических системах автоматического управления ВРД, реализованы пропорциональные и изодромные (пропорционально-интегральные) законы регулирования [48, 94].

При создании современных модификаций двигателей и замене гидромеханических систем управления на электронные цифровые системы управления типа FADEC выше третьего поколения необходимо иметь математическое описание двигателя, поскольку от полноты и точности которого во многом зависит эффективность работы системы управления.

В современных цифровых системах автоматического управления широкое распространение для регулирования параметров двигателя получили ПИ- и ПИД-законы регулирования, пропорциональная часть которых обеспечивает усиление управляющего воздействия, интегральная часть исключает ошибку

регулирования в статике, а дифференцирующая часть компенсирует фазовое отставание, вносимое интегрированием и переходным запаздыванием ВРД [75].

Регуляторы современных систем автоматического управления ВРД состоят из нескольких контуров управления параметрами двигателя. Обычно это задающий контур управления, обеспечивающий тягу или мощность двигателя, ограничители предельных максимальных значений параметров двигателя, ограничители предельных минимальных значений параметров двигателя, ограничители предельных скоростей изменения параметров двигателя при увеличении и уменьшении режима работы двигателя. Из них, в каждый момент времени, включая режим запуска двигателя, селектором выбирается один контур управления, имеющий меньшую (или большую) ошибку регулирования, в зависимости от алгоритма селектирования. Результирующая ошибка регулирования подается на вход пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), включенного после селектора, для управления дозатором топлива с обратной связью или без [70, 79].

В системе управления ВРД имеются также элементы, обеспечивающие управление механизацией двигателя, которая обычно реализуется с использованием гидроцилиндров. Гидроцилиндрами управляются направляющие аппараты компрессора, обеспечивающие согласование режимов работы лопаточной машины в зависимости от частоты вращения ротора, клапаны перепуска избытков воздуха из воздушного тракта компрессора, клапаны управления охлаждением лопаток и корпусов двигателя и другие.

Параметры регуляторов, реализующих ПИ- и ПИД-законы регулирования, выбираются исходя из параметров эталонной модели объекта управления с учетом передаточной функции управляющего органа – дозатора топлива или гидроцилиндра управления механизацией двигателя [78]. Параметры регуляторов и фильтров должны обеспечивать требуемое качество управления, необходимые запасы устойчивости по амплитуде и по фазе. Под качеством управления понимается выполнение требований к статической и динамической точности управления и к характеру переходных процессов.

Для достижения заданной динамической точности управления во всех вы-
сотно-климатических условиях в современных системах управления ВРД пре-
дусматривается приведение коэффициентов усиления и постоянных времени
корректирующих звеньев по параметрам воздуха на входе ВРД.

Параметры регулятора могут быть правильно выбраны лишь при наличии
полного математического описания объекта регулирования.

Ниже приведены примеры структурных схем современных систем управ-
ления ВРД, содержащие фильтры и регуляторы, их передаточные функции. На
структурных схемах также приведены передаточные функции ВРД как объекта
управления.

В качестве примера 1 на рис.1.12. приведены элементы системы управле-
ния частотой вращения силовой турбины низкого давления, вращающей венти-
лятор двигателя типа на примере ТРДД, с четким управлением на базе ПИ-
регулятора и неадаптивного фильтра.

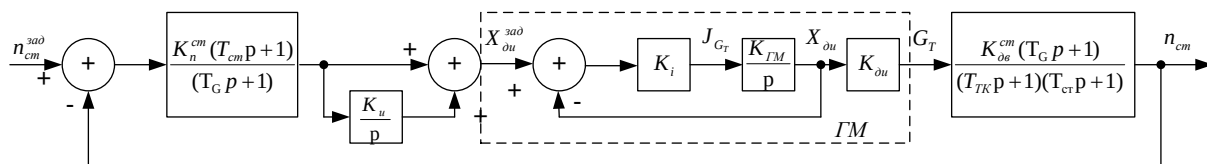


Рис.1.12. Пример системы управления частотой вращения $n_{ст}$ с ПИ-
регулятором, где K_n^{cm} , K_u – коэффициенты усиления пропорциональной и интеграль-
ной составляющей ПИ- регулятора соответственно, T_{cm} , T_G – постоянные времени си-
ловой турбины и двигателя, соответственно, X_{du}^{zad} , X_{du} – положение дозатора топлива
заданное и фактическое, K_i , $K_{ГМ}$, K_{du} – коэффициенты усиления гидромеханической
части (ГМ) дозатора, J_{GT} – управляющий ток электрогидропреобразователя, $K_{дв}^{cm}$ – ко-
эффициенты усиления двигателя, $T_{ГК}$ – постоянная времени турбокомпрессора

Элементами системы управления частотой вращения силовой турбины
низкого давления $n_{ст}$, представляющую собой схему типа «ГАЗ» и работающую
по отклонению, являются: задатчик, элемент сравнения, корректирующие про-
порциональное и интегро-дифференцирующее звенья регулятора, включая

фильтр, ПИ-регулятор с единичным коэффициентом усиления пропорциональной части, селектор (на схеме не показан), пропорциональный регулятор положения дозатора и элементы гидромеханической части (ГМ) системы управления, включающей дозатор, охваченный обратной связью, и объект управления - ТРДД. Параметры корректирующих звеньев выбираются таким образом, что бы фильтр $1/(T_G p + 1)$ компенсировал форсирующие свойства двигателя от влияния изменения расхода топлива $(T_G p + 1)$, форсирующее корректирующее звено $(T_{ст} p + 1)$ компенсировало инерционность ротора $1/(T_{ст} p + 1)$. И в случае если математическое описание и реальный объект не будут соответствовать друг другу, то в реальной замкнутой системе произойдет недокомпенсация или перекомпенсация соответствующих характеристик объекта управления и поведение системы будет отличаться от желаемого.

В качестве примера 2 на рис.1.13 приведены элементы системы управления частотой вращения $n_{ст}$ силовой турбины турбовального двигателя, представляющую собой схему типа «ШАГ» и работающую по отклонению с УВВ.

Для уменьшения забросов и провалов частоты вращения силовой турбины при изменении загрузки силовой турбины в структуру регулятора введен блок коррекции по возмущению с помощью УВВ, реализованный как реальное дифференцирующее звено.

Параметром $pn_{тк}$ на рис.1.13 обозначена точка подключения на селектор контура ограничения ускорения частоты вращения турбокомпрессора.

Рассмотренные ПИД-регуляторы эффективны только для объектов с неизменяемыми характеристиками и практически не оказывают заметного влияния на парирование возмущающих воздействий, а также на парирование изменения коэффициентов усиления ВРД по ресурсу [48, 94]. При этом реальные статические характеристики двигателей в процессе эксплуатации изменяются и ранее рассчитанные настройки регуляторов в контурах управления становятся не оптимальными. При расчете параметров системы управления необходимо учитывать изменение характеристик двигателей в процессе эксплуатации.

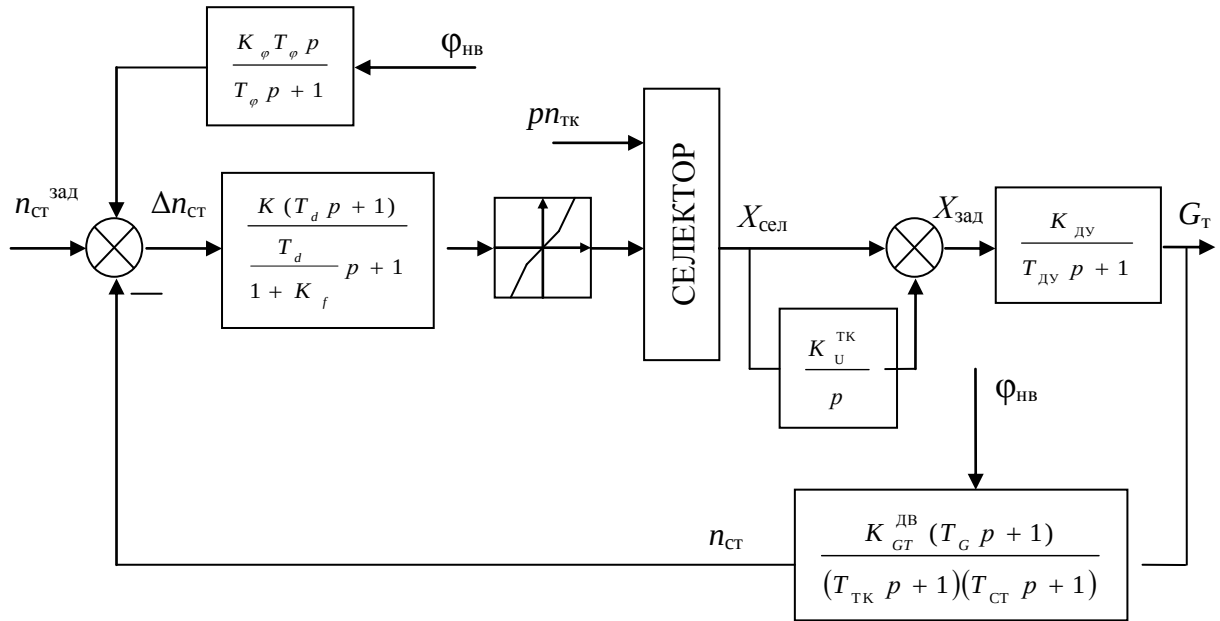


Рис.1.13. Пример системы управления частотой вращения силовой турбины с ПИ регулятором по отклонению и реальным дифференцирующим звеном по возмущению: $n_{ст}$ - частота вращения свободной турбины; $n_{ст}^{зад}$ – программное (заданное) значение частоты вращения силовой турбины; $\Phi_{НВ}$ – угол несущего винта; K – коэффициент усиления пропорциональной части регулятора; $T_{ст}$ – постоянная времени силовой турбины; $K_{тк}^U$ – коэффициент усиления интегральной части регулятора; $K_{ду}$ – коэффициент усиления дозирующего устройства; $T_{ду}$ – постоянная времени дозирующего устройства; $K_{ГТ}^{ДВ}$ – коэффициент усиления двигателя по контуру частоты вращения; $T_{тк}$ – постоянная времени турбокомпрессора; T_G – форсирующая постоянная времени; T_d – постоянная времени; T_{ϕ} – постоянная времени УВВ; K_{ϕ} – коэффициент усиления УВВ; K_f – коэффициент усиления; $G_т$ – расход топлива; $X_{зад}$ – заданное значение дозирующего устройства

На рис.1.14 приведен пример потери устойчивости системы управления частотой вращения ротора высокого давления n_2 двигателя на режиме работы от 15800 до 16500 об/м. Потеря устойчивости связана с некорректным для этого режима математическим описанием двигателя, как объекта управления.

Выбор параметров регуляторов и фильтров, исходя из параметров эталонной модели объекта управления, наличие полного математического описания объекта регулирования для обеспечения заданного качества управления являются недостатками современных систем управления ВРД.

Недостатками традиционно применяемых на практике методов проектирования САУ ВРД с использованием эталонной математической модели двигателя, обусловлены низким качеством идентификации объекта управления. В частности, в существующих эталонных математических моделях двигателя отсутствует адаптация к изменению внутренних и внешних возмущающих воздействий, старению элементов регуляторов, износу двигателя. Не учитывается влияние интегральной компоненты регулятора на устойчивость. А также требуется большой объем памяти для хранения массивов коэффициентов параметров эталонной модели ВРД по всем параметрам и настройкам регуляторов.

Принятые при построении эталонной модели системы управления ВРД приближения и допущения о линейности и отсутствия инерционности регулируемых органов и датчиков в реальных условиях могут быть недействительными, что может привести к неопределенности в управлении. [1-3, 31].

В настоящей работе предложены решения, устраняющие отмеченные выше недостатки.

Современные системы управления, функционирующие в условиях параметрической и структурной неопределенности, требуют применения новых подходов к обеспечению качества управления ВРД.

В частности, неопределенность ОУ обуславливает необходимость применения адаптивного 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.

Основные тенденции совершенствования систем управления ВРД связаны [1, 2, 10, 49]:

- с применением интеллектуальных технологий управления силовой турбиной и другими параметрами двигателя, основанных на алгоритмах адаптивного нечеткого управления;

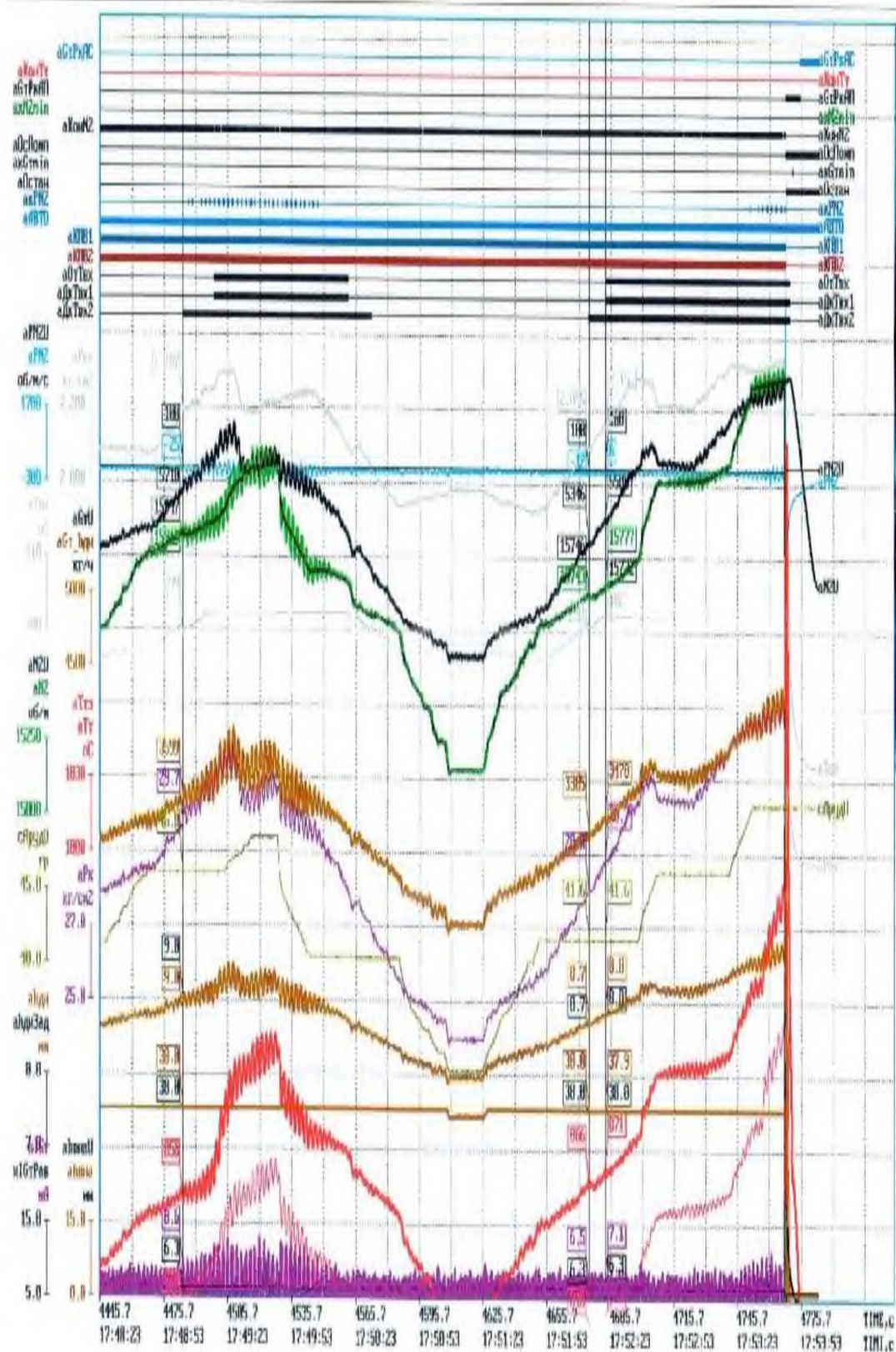


Рис.1.14. Пример потери устойчивости системы управления

- с исследованием инерционности ВРД как объекта управления и с проектированием адаптивных фильтров с целью повышения помехозащищенности управления;

- с введением гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления с целью исключения потери устойчивости при воздействии внешних и внутренних возмущений с применением условного критерия устойчивости.

Реализация основных тенденций совершенствования элементов систем управления ВРД, связанных с применением интеллектуальных технологий управления, основанных на знаниях (алгоритмов адаптивного нечеткого управления), с исследованием инерционности ВРД в разных режимах работы, с введением гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления, представляет собой актуальную в настоящее время задачу и рассмотрена в настоящей диссертационной работе.

В этой связи устранение отмеченных недостатков классических регуляторов [1, 2], создание новых регулирующих устройств ВРД, таких как адаптивные нечеткие регуляторы, адаптивные фильтры, обеспечение гарантированного запаса устойчивости, является актуальной задачей. В работе предлагаются варианты разработки средств управления ВРД на базе специализированной сети *Alfis*, адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

Разработка элементов систем управления ВРД с астатизмом и адаптацией к внешним условиям, с применением нелинейных аппроксиматоров является одним из возможных путей повышения качества управления ВРД [100, 103]. Для математического моделирования новых методов управления ВРД в работе использовались линейные или нелинейные динамические модели ОУ, которые приведены в приложениях А и Б.

1.3 Постановка задачи исследования систем управления с гарантированной устойчивостью

Ранее приведены пути совершенствования систем управления за счет структурных изменений в системах. Одним из перспективных путей совершенствования систем управления, с точки зрения его практической значимости является путь, направленный на создание адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью, который реализован в настоящей работе и обеспечит решение следующей задачи:

1. Разработка нового адекватного подхода к синтезу адаптивных нечетких регуляторов для систем управления с учетом требований к встроенным системам управления, работающих в режиме реального времени.

В процессе исследований планируется разработать математические модели и функциональные схемы адаптивных нечетких регуляторов систем управления ВРД, рассмотреть включение адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров в контуры управления ВРД. Выбор моделей должен быть обусловлен необходимостью адаптации к изменяющимся характеристикам объекта управления и обеспечения гарантируемого запаса устойчивости замкнутой системы управления.

Предполагается исследовать возможность применения адаптивных нечетких регуляторов для управления ВРД, основанных одновременно и на математическом аппарате специализированной сети *Anfis* и на нечеткой логике (fuzzy logic), что характеризует новизну данной работы. Адаптивные нечеткие регуляторы для управления ВРД должны обладать свойствами адаптации к изменяющемуся объекту управления, гарантированной устойчивостью, реализуемостью в бортовой авиационной аппаратуре и возможностью работы в «жестком» реальном времени.

В качестве вариантов реализации адаптивного нечеткого регулятора планируется рассмотреть:

- специализированную сеть *Anfis* (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*), реализующую алгоритм нечеткого вывода Такаги-Сугено. Математи-

ческий аппарат специализированной сети *ANFIS* входит в состав пакета *Fuzzy Logic Toolbox* среды *Matlab-Simulink* и гарантирует достоверность результатов исследования [95].

– адаптивный нечеткий регулятор, удовлетворяющий требованиям реализуемости в бортовой авиационной аппаратуре и возможности работы в жестком реальном времени, для которого планируется выбрать алгоритм адаптации и выполнить синтез алгоритма адаптивного нечеткого управления на примере регулирования температуры газа за турбиной ВРД. Выбор данного параметра в качестве примера связан с необходимостью реализации в данном контуре управления, как адаптивных нечетких регуляторов, так и адаптивных фильтров.

Должен быть разработан метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов для встроенных систем управления ВРД с учетом требований системы реального времени.

2. Создание метода синтеза адаптивных фильтров с целью улучшения качества управления с учетом изменения его инерционности в разных режимах работы.

В замкнутой системе управления имеются элементы, обладающими фильтрующими свойствами и предназначенные для подавления помех, которые могут повлиять на процесс управления. Одновременно эти элементы предназначены для компенсации форсирующих свойств объекта управления. Широко распространенные в существующей практике фильтры имеют неизменяемые характеристики и не могут корректно парировать изменение форсирующих свойств объекта управления. В этой связи актуально усовершенствование алгоритмов управления на основе применения адаптивных режекторных фильтров.

Отсюда необходимо разработать метод расчета и алгоритм построения адаптивных режекторных фильтров, основанный на применении теории чувствительности для количественной оценки текущей инерционности объектов управления, таких как, например, ВРД. Предлагаемый метод синтеза фильтров должен повысить качество управления ВРД за счет учета в системе управления

изменение инерционности объекта управления на разных режимах работы двигателя, что характеризует новизну в работе.

3. Разработать подход к обеспечению гарантированного запаса устойчивости систем управления на основе применения адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

Предлагаемый подход расчета гарантированного запаса устойчивости контуров для управления ВРД, базируется на модифицированном критерии Найквиста, который имеет второе название как круговой критерий устойчивости. Отличие модифицированного критерия Найквиста от известного критерия Найквиста заключается в том, что модифицированный критерий Найквиста расширяет границу устойчивости от точки до некоторой области круга на комплексной плоскости, тем самым применение кругового критерия устойчивости при проектировании системы управления обеспечит гарантируемую устойчивость системы управления при изменении характеристик объекта управления в процессе его работы.

В результате работы должны быть разработаны методы, алгоритмы и программы, обеспечивающие гарантированный запас устойчивости систем управления ВРД с применением адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

В работе приведены результаты исследований предложенных подходов и практическая реализация разработанных элементов систем управления, направленных на улучшение качественных и эксплуатационных характеристик управления ВРД с использованием адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров.

1.4 Выводы по первой главе

Проведен обзор существующих структурных решений систем управления ВРД.

Рассмотрены обобщенные структуры систем управления ВРД, их элементы (регуляторы и фильтры), определены достоинства и недостатки.

Выполнен сравнительный анализ реализованных в современной практике вариантов структурных схем управления ВРД, основанных на применении линейных законов регулирования.

Анализ недостатков традиционно применяемых на практике методов проектирования элементов системы управления ВРД с использованием эталонной математической модели двигателя, обусловленных низким качеством идентификации объекта управления, определил путь дальнейшего совершенствования систем управления ВРД на основе адаптивных элементов систем управления, которые обеспечивают гарантированный запас устойчивости системы управления.

Сформулированы задачи исследования, направленные на реализацию основных тенденций совершенствования элементов систем управления ВРД, связанных с применением интеллектуальных технологий управления, основанных на знаниях (алгоритмов адаптивного нечеткого управления), с учетом инерционности ВРД в разных режимах работы и введением гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления.

2. Метод анализа и синтез адаптивных нечетких регуляторов

Разработка оптимальных систем управления ВРД невозможна без детального изучения динамических свойств двигателей, определяемых протекающими в них газодинамическими и тепловыми процессами, а также механическими свойствами их подвижных частей. Также при проектировании современных систем управления следует учитывать, что свойства двигателей существенно меняются при изменении внешних условий, например, при изменении давления и температуры в атмосфере.

Постоянно растущая сложность и разнообразие задач, решение которых возлагается на автоматические системы в условиях неопределенности математического описания объекта управления, в последнее время определяют повышенную потребность в системах управления с более универсальными свойствами. Подходящими для решения большинства задач, возлагаемых на автоматические системы, являются системы, основанные на нечеткой логике [4, 22, 37, 88, 89].

По сравнению с традиционными методами анализа и вероятностным подходом к управлению, нечеткое управление позволяет проводить анализ задачи управления и получать результаты управления с заданной точностью, обеспечивать значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании адаптивных нечетких регуляторов и создания систем управления для объектов, где нецелесообразно применять методы традиционной теории управления [10, 31, 94]. Управление техническими объектами на основе нечеткой логики является простым и надежным в реализации [49, 86, 101].

Нечеткие регуляторы отличаются от обычных ПИД регуляторов тем, что для описания системы используются знания экспертов вместо дифференциальных уравнений [45, 49]. При создании нечеткого регулятора имеется возможность использования аналогии ассоциативного мышления человека и результатов развития экспертных систем, которые способны аккумулировать знания, полученные в различных областях деятельности. На основе аккумулированных

знаний формируется база знаний. База знаний включает в себя продукционные правила, связывающие лингвистические переменные. База знаний формируется на стадии проектирования нечеткого регулятора, на основе знаний о свойствах объекта управления по следующей технологии: задается цель управления и при выделении существенных и отсеке второстепенных факторов определяется начальное состояние системы, ее желаемое конечное состояние и правила действий, переводящих систему из начального состояния в желаемое конечное состояние. Нечеткие регуляторы позволяют работать с объектами управления с неполной информацией об объекте и обеспечивают получение качественных переходных процессов, без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классических методов управления, например с использованием принципа максимума. Особенностью нечетких регуляторов является возможность реализации нелинейной характеристики, а также низкая чувствительность по отношению к изменению параметров объекта управления в определенном диапазоне.

При неполной информации об объекте управления система автоматического управления должна обладать адаптивными свойствами. Для придания адаптивных свойств элементам системы управления, ниже рассмотрена возможность применения следующих методов адаптации нечетких систем управления:

- специализированная сеть *Anfis* и ее модификации [95];
- стохастический метод (метод Уидроу-Хоффа) [106];
- модифицированный метод наименьших квадратов [47];
- метод последовательного обучения [37].

2.1 Модели построения адаптивных нечетких регуляторов

Рассмотрены две модели системы автоматического управления, 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 объекта управления в процессе эксплуатации.

Модель №1. Первая модель замкнутой системы автоматического управления состоит из объекта управления по параметру частоты вращения силовой турбины ВРД и регулятора, реализованного специализированной сетью *Anfis*.

Первая модель, построенная на основе специализированной сети *Anfis*, выбрана для рассмотрения в ходе данного исследования, что бы продемонстрировать возможность адаптивного управления таким объектом, как ВРД.

Специализированная сеть *Anfis* построена на элементах нечеткой логики (фаззификация, блок нечеткого вывода и дефаззификация), которая обучается комбинированным методом [55, 98]. Адаптивная сеть *Anfis* содержит элементы нечеткого управления: входной слой, отражающий лингвистические переменные, фаззификатор для перевода четкой информации в нечеткую информацию, блок нечетких правил, блок нечеткой импликации, нормализатор для контроля выполнения нечетких правил, алгоритм Сугено-Такаги для перевода нечеткой информации в четкую информацию (дефаззификатор).

Модель №1 включает: задатчик, элемент сравнения, адаптивный фильтр, сеть *Anfis*, состоящая из фаззификатора на синглетонной базе, нечеткого импликатора, нормализатора и дефаззификатора (алгоритм Сугено-Такаги), селектор, дозатор топлива, состоящий из ПИ-регулятора управления положением дозатора, линейного электрогидравлического устройства управления дозатором с обратной связью и собственно дозирующего устройства, объект регулирования - ВРД, датчик.

Структурная схема модели №1 приведена на рис.2.1

Преимущества модели №1 заключаются в обеспечении желаемых переходных процессов после обучения сети комбинированным методом, а также в простоте настройки за счет применения инструментального пакета *Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset)* среды *Matlab-Simulink*.

К недостаткам следует отнести необходимость обучения с достаточно большим временем обучения. Модель №1 трудно реализуема в авиационной бортовой аппаратуре из-за значительных вычислительных ресурсов, требуемых на ее реализацию [54, 55].

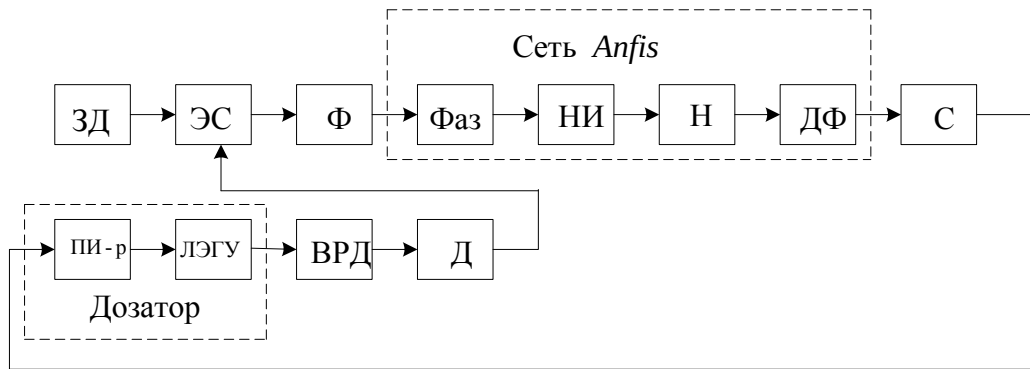


Рис.2.1. Структурная схема модели №1: ЗД – задатчик; ЭС – элемент сравнения; Фаз – фаззификатор; Ф – адаптивный фильтр; НИ – нечеткий импликатор; Н – нормализатор; ДФ – дефаззификатор; ЛЭГУ – линейное электрогидравлическое устройство; ВРД – воздушно-реактивный двигатель; Д – датчик

Отсюда модель №1 может быть рекомендована к применению в автоматизированных системах управления в промышленности, например для управления ВРД промышленными энергетическими установками, такими как газотурбинные электростанции и газоперекачивающие агрегаты.

Такие системы характеризуются длительным временем непрерывной работы и наличием времени на плановые ремонты. Во время планового ремонта промышленной энергетической установки специализированную имеется необходимое время для обучения сети *Anfis* до следующего планового ремонта. Значительные вычислительные ресурсы, требуемые на реализацию специализированную сеть *Anfis*, не является ограничением для современных систем управления промышленными энергетическими установками.

Модель №2. Вторая модель замкнутой системы автоматического управления состоит из объекта управления по основному параметру регулирования ВРД и адаптивного нечеткого регулятора.

Вторая модель, построенная на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации, синтезируется и исследуется с целью обеспечения следующих, необходимых для авиационной техники, характеристик сис-

темы управления: наличие адаптивных свойств, парирующих изменение характеристик объекта управления, обеспечение гарантированной устойчивости, возможность автоматической работы в качестве элементов встроенной системы управления в бортовой авиационной аппаратуре в «жестком» реальном времени, в условиях невозможности реализации длительного цикла обучения тех элементов системы управления, которые отвечают за адаптивность.

Особенностью модели №2 является адаптивный нечеткий регулятор, который реализован на базе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации, блока нечеткой импликации и блока дефаззификации на базе метода разности площадей.

Метод адаптации фаззификатора будет выбран в процессе исследования исходя из поставленных целей [56, 58, 59].

От известных в настоящее время нечетких регуляторов, адаптивный нечеткий регулятор, предложенный в настоящей работе, отличается тем, что в адаптивном нечетком регуляторе фаззификатор нечеткого регулятора обладает свойствами адаптации по выбранному в процессе синтеза критерию, например минимизация ошибки регулирования, первой и/или второй производной ошибки регулирования или другому.

Обучение элемента системы управления, реализующего функцию адаптации, должно выполняться в реальном масштабе времени, за время не более одного цикла работы системы. Предложенный метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов, который позволяет учесть требования реального времени и реализуемости в бортовой авиационной аппаратуре, характеризует новизну настоящей работы [62].

Модель №2 содержит: задатчик, элемент сравнения, адаптивный фильтр, адаптивный фаззификатор на синглетонной базе (синглетон — множество с единственным элементом), блок дефаззификации, селектор, дозатор, состоящий из ПИ-регулятора и линейного электрогидравлическое устройства с обратной связью, ВРД, датчик.

Структурная схема модели №2 приведена на рис.2.2.

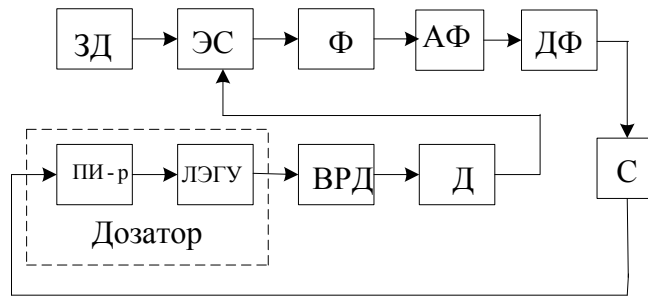


Рис.2.2. Структурная схема модели №2: 3Д – задатчик; ЭС – элемент сравнения; Ф – адаптивный фильтр; АФ – адаптивный фаззификатор; ДФ – дефаззификатор; ЛЭГУ – линейное электрогидравлическое устройство; ВРД – воздушно реактивный двигатель; Д – датчик

Преимущества модели №2 заключаются в том, что данная модель обеспечивает обучение в реальном времени. Данная модель пригодна для реализации в авиационной бортовой аппаратуре и позволяет получить желаемые переходные процессы.

К недостаткам модели №2 следует отнести более сложный процесс настройки адаптивного нечеткого регулятора при его проектировании. В связи с этим предлагается методика синтеза и настройки адаптивного нечеткого регулятора.

Модель №2 может быть рекомендована для встроенных автоматических систем управления авиационными ВРД.

На структурных схемах с элементами систем управления модели №1 и модели №2, приведенных на рис.2.1 и рис.2.2, соответственно, имеется линейное электрогидравлическое устройство, охваченное обратной связью, которое совместно с ПИ-регулятором обеспечивают дозирование топлива в ВРД.

Устройство управления дозированием топлива, содержащее в своем составе гидроцилиндр, может рассматриваться как отдельный объект управления. Поскольку управление гидроцилиндрами имеет широкое практическое распространение в промышленности и на транспорте, а так же, в частности, в системах управления ВРД, помимо функции дозирования топлива управление гидроцилиндрами применяется для управления механизацией двигателя, этому вопросу в работе посвящен отдельный раздел.

Помимо линейного электрогидравлического устройства в системах управления ВРД, рассмотрены схемы управления с нелинейным электрогидравлическим устройством и с электрогидравлическим устройством, не охваченным обратной связью.

Из модели № 2, модифицируя объект управления – устройство управления дозированием топлива за счет применения нелинейного электрогидравлического устройства и, соответственно, модифицируя адаптивный нечеткий регулятор, получаем вариант модели № 2 – модель № 2.1.

На рис.2.3. приведена структурная схема модели № 2.1. Ее особенностью является включение в контур управления нелинейного электрогидравлического устройства, охваченного обратной связью.

Наличие нелинейного электрогидравлического устройства, охваченного обратной связью, изменяет состав элементов системы управления в связи с необходимостью введения дополнительных корректирующих звеньев.

Из модели №2, модифицируя объект управления - устройство управления дозированием топлива за счет исключения отрицательной обратной связи по положению и соответственно модифицируя адаптивный нечеткий регулятор, получаем еще один вариант модели № 2 – модель № 2.2.

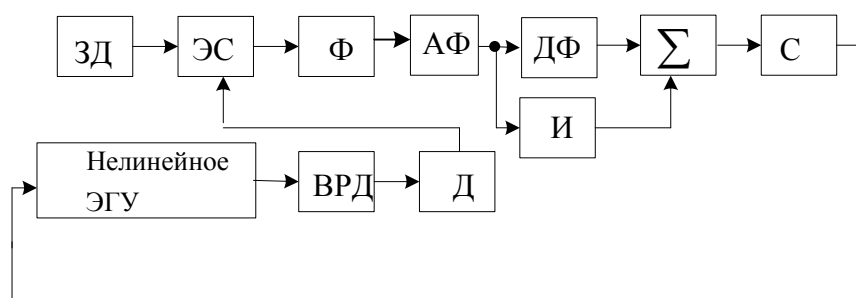


Рис. 2.3. Структурная схема модели № 2.1: ЗД – задатчик; ЭС – элемент сравнения; Ф – адаптивный фильтр; АФ – адаптивный фаззификатор; ДФ – дефаззификатор; И – интегратор; С – селектор; ВРД – воздушно-реактивный двигатель; Д – датчик

На рис.2.4. приведена структурная схема модели №2.2. Ее особенностью является включение в контур управления нелинейного электрогидравлического устройства, не охваченного обратной связью.

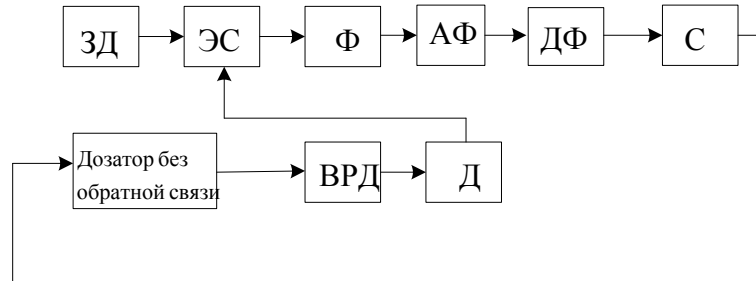


Рис. 2.4. Структурная схема модели № 2.2: ЗД – задатчик; ЭС – элемент сравнения; Ф – адаптивный фильтр; АФ – адаптивный фаззификатор; ДФ – дефаззификатор; С – селектор; ВРД – воздушно-реактивный двигатель; Д – датчик

Наличие нелинейного электрогидравлического устройства, не охваченного обратной связью, также изменяет состав элементов системы управления. Дозирующее устройство с обратной связью из фильтрующего звена превращается в интегрирующее звено при исключении обратной связи.

На основе разработанных моделей №1 и № 2 ниже приведен синтез адаптивных нечетких регуляторов. Синтез адаптивных нечетких регуляторов по моделям №2.1 и №2.2 выполняется аналогично синтезу адаптивного нечеткого регулятора по модели №2.

2.2 Синтез адаптивных нечетких регуляторов на основе специализированной сети *Anfis*

2.2.1 Метод построения нечеткого регулятора.

Для повышения качества управления (для снижения величины забросов и провалов частоты вращения силовой турбины, для сокращения времени переходных процессов) в работе предложено применение в качестве элемента системы управления сети *Anfis* (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*),

представленной в программном пакете *Fuzzy Logic Toolbox* среды *Matlab-Simulink* [96].

Сеть *Anfis* является элементом системы управления, представленной моделью №1 (см. рис.2.1) и имеет следующие слои: слой фаззификации, слой нечеткой импликации, слой нормализации, выходной слой.

Регулятор управления частотой вращения силовой турбины является основным контуром управления на установившихся режимах работы ТВД. Математическая модель ТВД с силовой турбиной и нагрузкой описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Нагрузкой для ТВД вертолета является несущий винт (НВ), мощность которого определяется изменением угла поворота лопастей НВ:

$$N_{\text{НВ}} = f(\varphi, n_{\text{СТ}}, T_{\text{ВХ}}^*, P_{\text{ВХ}}^*)$$

где $N_{\text{НВ}}$ – мощность НВ (л.с.); φ – угол поворота рабочих лопастей НВ, (град.); $n_{\text{СТ}}$ – частота вращения силовой турбины, (%); $T_{\text{ВХ}}^*$ и $P_{\text{ВХ}}^*$ – соответственно температура в кельвинах (К) и давление воздуха, (кгс/см²) на высоте полета Н. Взаимодействие силовой турбины и НВ выражается уравнением динамики:

$$Jn_{\text{СТ}} \frac{dn_{\text{СТ}}}{dt} = N_e - N_{\text{НВ}},$$

где $Jn_{\text{СТ}}$ – суммарный приведенный к валу силовой турбины момент инерции НВ (кгс•м); N_e – мощность силовой турбины (л.с.).

В эксплуатирующихся системах «ШАГ» и «ГАЗ» автоматическое управление частоты вращения силовой турбины (см. рис.1.4 и рис. 1.7) реализовано на базе одноконтурной системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью и УВВ, парирующим влияние изменения угла НВ на частоту вращения силовой турбины.

Результаты исследования [70, 78] показали невозможность достижения заданной точности управления. Переходные процессы в контурах систем управления типа «ШАГ» и «ГАЗ» имеют забросы и провалы частоты вращения силовой турбины длительным временем переходного процесса порядка 10 с. Ли-

нейные законы управления не дают удовлетворительных результатов, следовательно, применяются нелинейные [31, 43].

Известно, что нелинейные законы управления во многих случаях обеспечивают лучшее качество регулирования [31, 103].

Процесс настройки адаптивных нечетких регуляторов в замкнутой системе регулирования близких к оптимальным остается трудной и до конца нерешенной задачей [4, 23]. Для настройки адаптивных свойств элементов систем управления могут использоваться обучающие алгоритмы.

В частности, в настоящей работе, для оптимизации адаптивного нечеткого регулятора использован инструментальный пакет *Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset)* среды *Matlab-Simulink*, который предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки параметров динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов [95]. Алгоритм оптимизации из пакета *Optimization Toolbox* среды *Matlab-Simulink* выбран из тех соображений, что среда моделирования *Matlab-Simulink* предоставляет широкие возможности для исследований и удобна в использовании. Ход оптимизации контролируется на экране с помощью отображения графика контролируемого процесса и текущих значений минимизируемой функции.

В качестве средства достижения указанной цели принимается оптимизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. При помощи данного инструмента можно настраивать параметры нелинейной *Simulink*-модели, в качестве которых может быть задано любое количество переменных. Задание динамических ограничений осуществляется в визуальном режиме. На базе этих ограничений *NCD-Blockset* автоматически генерирует задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса. Эта задача решается с привлечением специализированной процедуры квадратичного про-

граммирования из пакета *Optimization Toolbox*. По завершении процесса его результат фиксируется в рабочем пространстве.

На рис. 2.5 приведена специализированная сеть *Anfis*, которая имеет две входные лингвистические переменные, представленные в относительном виде: ошибка регулирования, представляющая рассогласование между требуемой и фактической частотами вращения силовой турбины, и скорость изменения ошибки регулирования. Сигнал на выходе специализированной сети *Anfis* «к селектору» поступает на вход регулятора управления положением дозирующего устройства.

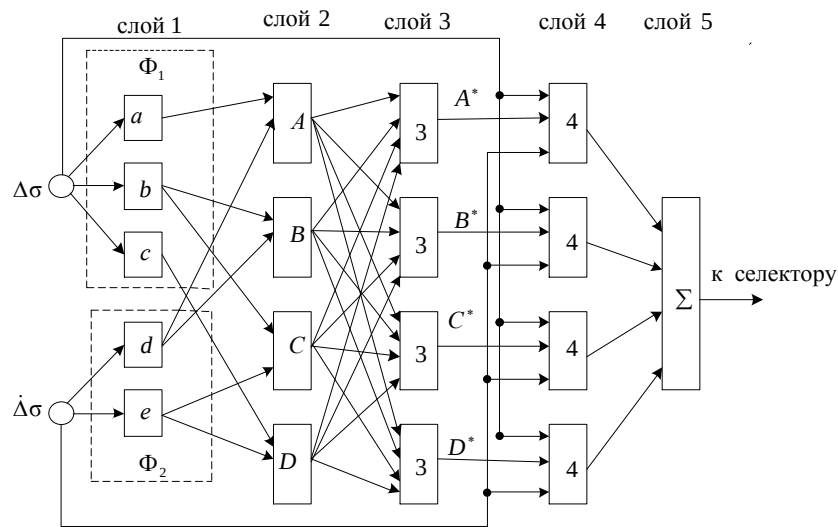


Рис. 2.5. Специализированная сеть *Anfis*

Для адаптивного управления ВРД применена *Anfis* – сеть прямого распространения сигнала. Сеть *Anfis* построена на элементах нечеткого управления с единственным выходом и несколькими входами, которые представляют собой нечеткие лингвистические переменные. При этом термы входных лингвистических переменных описываются стандартными функциями принадлежности, а выход представлен уравнениями Сугено-Такаги.

Элементы в слоях *Anfis*- сети имеют разную структуру и назначение: функции принадлежности, правила, нормализация, линейные функции, выходное значение (сумма).

Проекции входного вектора a, b, c, d, e 1-го слоя задаются функциями принадлежности. Слой является адаптивным.

Каждый нечеткий нейрон (A, B, C, D) слоя 2 вычисляет произведение входов по Ларсену. Слой является фиксированным.

Слой 3 вычисляет нормированные уровни активации правил. Слой является фиксированным.

Слой 4 вычисляет заключения правил. Слой является адаптивным.

Слой 5 представлен единственным узлом, вычисляющим сумму своих аргументов. Вычисляется результат нечёткого вывода. Слой является фиксированным.

Слой 1 представлен двумя фаззификаторами Φ_1 и Φ_2 . Фаззификатор Φ_1 представлен как терм-множество из трех терм a, b, c , а фаззификатор Φ_2 – двумя термами d, e . В качестве терм фаззификаторов Φ_1 и Φ_2 приняты функции Гаусса либо сигмоидные функции, которые допускают дифференцирование. Аналитические формулы функций принадлежности, допускающих дифференцирование, приведены ниже.

Сигмоидная функция

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\kappa x)}$$

$$\frac{dF(x)}{dt} = \kappa F(x)(1 - F(x)) \quad (2.1)$$

Функция Гаусса

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$

Функция Гаусса, выраженная через сигмоидные функции

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp(-w_1(x - w_{cm1}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_2(x - w_{cm2}))}$$

Фаззификация слоя 1 выполнена на синглетонной базе для формирования степеней принадлежности активированных терм в соответствии с текущими значениями лингвистических переменных.

Для формирования слоя 2 записываются продукционные правила (база знаний, когда связь лингвистическими переменными однозначна):

A. Большое отрицательное отклонение ошибки термы a требует большой положительной производной термы d .

B. Уменьшение отрицательного отклонения ошибки термы b требует уменьшения положительной производной термы d .

C. Уменьшение положительного отклонения ошибки термы b требует уменьшения отрицательной производной термы e .

D. Большое положительное отклонение ошибки термы c требует большой отрицательной производной термы e .

Для определения отношений между степенями принадлежности активированных входных лингвистических переменных нечеткая импликация выполнена согласно алгоритму Ларсена [102]:

$$A : \mu_{R_{a \rightarrow d}} = \mu_a(u) * \mu_d(u_1) ;$$

$$B : \mu_{R_{b \rightarrow d}} = \mu_b(u) * \mu_d(u_1) ;$$

$$C : \mu_{R_{b \rightarrow e}} = \mu_b(u) * \mu_e(u_1) ;$$

$$D : \mu_{R_{c \rightarrow e}} = \mu_c(u) * \mu_e(u_1) .$$

После определения абсолютных значений степеней истинности активированных входных лингвистических переменных проводится нормализация:

$$\begin{aligned} A^* &= \frac{A}{A + B + C + D} ; & B^* &= \frac{B}{A + B + C + D} ; \\ C^* &= \frac{C}{A + B + C + D} ; & D^* &= \frac{D}{A + B + C + D} . \end{aligned}$$

Согласно алгоритму Сугено-Такаги [107] рассчитываются вклады четырех нечетких правил в выходной сигнал регулятора с последующим суммированием вкладов всех правил:

$$\begin{aligned} y_1 &= A^* (\epsilon_{01} + \epsilon_{11} \Delta \sigma + \epsilon_{21} \dot{\Delta} \sigma) ; & y_2 &= B^* (\epsilon_{02} + \epsilon_{12} \Delta \sigma + \epsilon_{22} \dot{\Delta} \sigma) ; \\ y_3 &= C^* (\epsilon_{03} + \epsilon_{13} \Delta \sigma + \epsilon_{23} \dot{\Delta} \sigma) ; & y_4 &= D^* (\epsilon_{04} + \epsilon_{14} \Delta \sigma + \epsilon_{24} \dot{\Delta} \sigma) . \end{aligned}$$

$$y = \sum_{i=1}^4 y_i \cdot$$

Настройка *Anfis*-сети [98] с двумя лингвистическими переменными и четырьмя нечеткими правилами базы знаний выполняется комбинацией методов градиентного спуска в виде алгоритмов обратного распространения ошибки (ОРО) [37] и метода наименьших квадратов (МНК) [47]. Алгоритм ОРО применен для настройки *Anfis*-сети как алгоритм, относящийся к быстрым алгоритмам обучения нейронных сетей. Алгоритм ОРО настраивает коэффициенты антецедентов (функция Гаусса). Метод МНК оценивает коэффициенты заключения правил, так как они линейно связаны с выходом сети. Каждая итерация выполняется в два этапа согласно гибриднему методу.

На первом этапе на входы сети подается обучающаяся выборка и по невязке между желаемым и действительным поведением сети по методу наименьших квадратов находятся оптимальные параметры узлов четвертого слоя.

На втором этапе остаточная невязка передается с выхода сети на её входы и методом ОРО модифицируются параметры узлов первого слоя. При этом найденные на предыдущем этапе коэффициенты заключения правил не изменяются.

Итерационная процедура настройки продолжается пока невязка превышает заранее установленное значение, выбор которого осуществляется экспертным путем. Для настройки коэффициентов функции Гаусса, кроме метода ОРО, могут использоваться в другие алгоритмы оптимизации, в частности метод покоординатного движения.

2.2.2 Результаты исследования адаптивного нечеткого регулятора частоты на базе специализированной сети *Anfis*

Предложенная модель системы управления – адаптивный нечеткий регулятор на базе специализированной сети *Anfis* апробирован на примере контура стабилизации частоты вращения силовой турбины ТВД, работающего в реальном времени. Выполнен анализ полученных адаптивных свойств построенного регулятора.

На рис.2.6 приведена структурная схема устройства стабилизации частоты вращения силовой турбины ТВД, разработанная на базе специализированной сети *Anfis*.

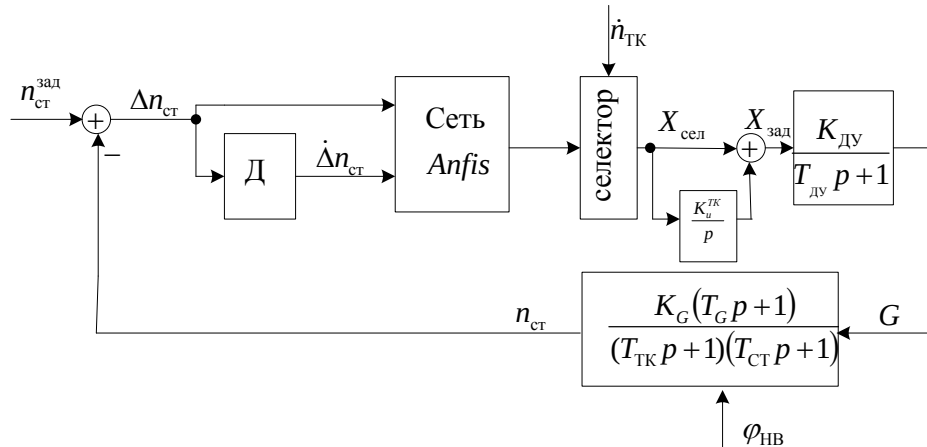


Рис.2.6 Устройство стабилизации частоты вращения силовой турбины ВРД на базе специализированной сети *Anfis*.

Для проверки работоспособности разработанного адаптивного нечеткого регулятора на базе сети *Anfis* и сравнения результатов моделирования с ПИ- и ПИД-регуляторами составлена математическая модель исследуемой системы автоматического регулирования в *Matlab-Simulink*, которая включает нелинейную модель ТВД (см. приложение А), линейную модель электрогидравлической исполнительской части, модель электронной части, включающую контур ограничения ускорения частоты вращения турбокомпрессора, и контур регулирования частоты вращения силовой турбины. Модели двигателя и электрогидравлической части рассчитываются с шагом интегрирования 0,004 с, модель электронной части рассчитывается с шагом 0,02 с. Настройка сети *Anfis* осуществляется по имеющимся экспериментальным данным работы ПИ- и ПИД-регулятора и заключается в определении количества правил, коэффициентов линейных уравнений, параметров функций принадлежности (функций Гаусса). Количество правил определяется алгоритмом структурной идентификации, коэффициенты линейных уравнений – методом МНК, параметры функций принадлежности – методом ОРО с помощью *Anfis* -редактора.

На рис. 2.7 приведены входные экспериментальные сигналы изменения положения несущего винта φ , давления воздуха $P_{\text{ВХ}}^*$ и температуры воздуха $t_{\text{ВХ}}^*$ на входе в двигатель.

Входной сигнал «изменение угла несущего винта» представляет собой периодический прямоугольный сигнал со случайной амплитудой в диапазоне от 0 до 20 град. Время нарастания фронта 3 с, время спада фронта 2 с. Входные сигналы «давление воздуха на входе в двигатель» и «температура воздуха на входе в двигатель» соответствуют изменению высоты полета в диапазоне от 0 км до 4 км.

Используется 9000 точек экспериментальных данных. Экспериментальные данные разделяются на обучающую и тестовую выборки. В обучающую выборку входит первая половина данных, а в тестовую – вторая. Перед обучением входные и выходные данные сети нормируются в единичный интервал.

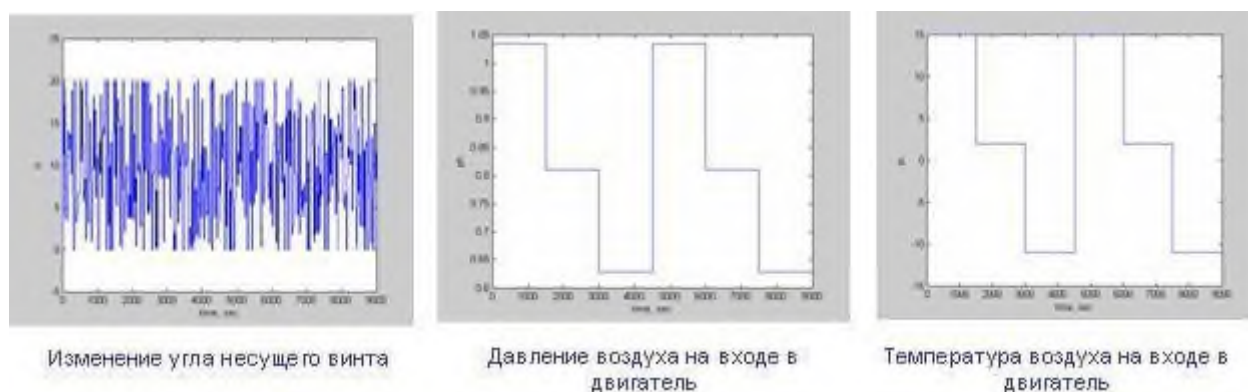


Рис.2.7. Входные сигналы для получения информативного множества экспериментальных данных

Оптимизация выполнялась для земных условий при соответствующих параметрах воздуха $t_{\text{ВХ}}^*$ и $P_{\text{ВХ}}^*$: $t_{\text{ВХ}}^* = 288 \text{ K}$, $P_{\text{ВХ}}^* = 1,033 \text{ кгс/см}^2$ и при задании возмущения по углу несущего винта:

- при увеличении потребной мощности несущего винта φ изменяется с 0 град на 16 град за 3 с.;
- при уменьшении потребной мощности несущего винта φ изменяется с 16 град на 0 град за 2 с.

Программное значение частоты вращения силовой турбины задано величиной 100 %. Время подачи возмущений по углу несущего винта, изменяющих потребную мощность несущего винта в процессе моделирования на 15 с и на 40 с, (см. рис. 2.9).

С помощью пакета *NCD-Blockset* полученная сеть была оптимизирована в замкнутой системе регулирования. Всего в процессе оптимизации настраивалось двадцать два переменных коэффициента (10 переменных коэффициентов для настройки функций Гаусса + 12 переменных коэффициентов алгоритма Сугено-Такаги).

На рис. 2.8 представлены функции принадлежности и поверхность «входы-выход» регулятора до и после процесса оптимизации.

На рис. 2.9 представлены осциллограммы переходных процессов в начале и в конце процесса оптимизации.

На рис. 2.10 представлены осциллограммы переходных процессов в системе регулирования с классическим регулятором, с ненастроенным нечетким регулятором и с предложенным настроенным нечетким регулятором.

Показано, что время переходного процесса регулирования для синтезированного по разработанному методу построения регулятора оказалось меньше, а забросы и провалы частоты вращения силовой турбины больше, чем у классического регулятора, имеющего коэффициенты усиления, подобранные по результатам итерационного математического моделирования и эксплуатации вертолетов. После оптимизации нечеткого регулятора в *NCD-Blockset* время переходного процесса регулирования, а также забросы и провалы частоты вращения силовой турбины удовлетворяют заданным в *NCD-Blockset* динамическим ограничениям (рис. 2.10).

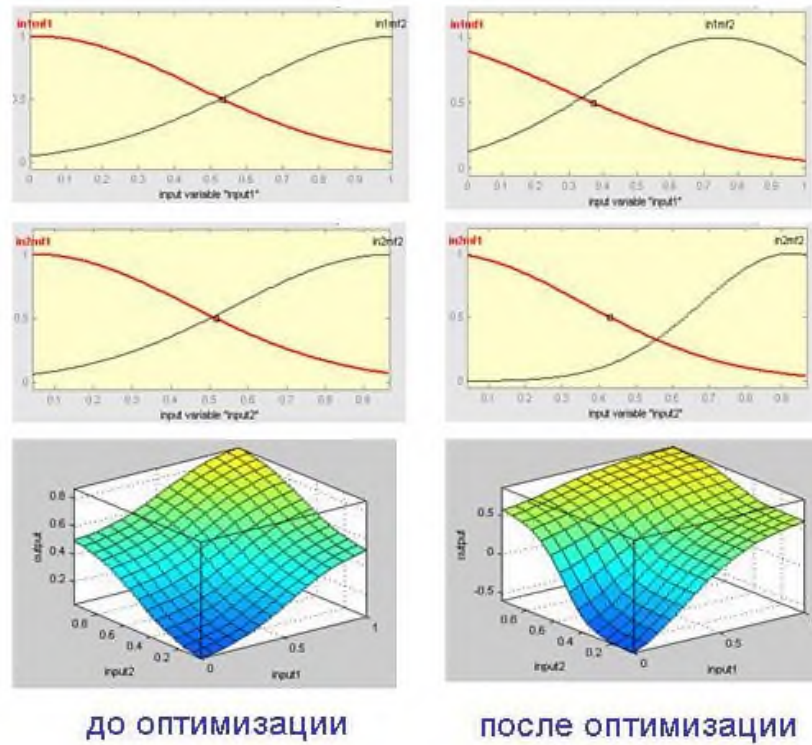


Рис.2.8. Функции принадлежности и поверхность «входы-выход» ненастроенного и настроенного нечеткого регулятора на базе сети *Anfis*



Рис. 2.9. Осциллограммы процесса оптимизации нечеткого регулятора в *NCD-Blockset* в системе регулирования

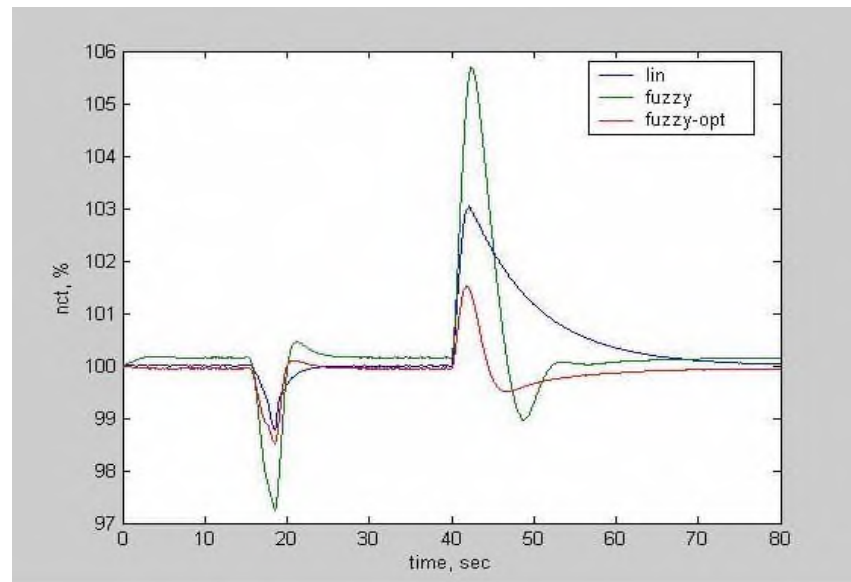


Рис.2.10. Осциллограммы переходных процессов в системе регулирования с классическим регулятором (lin, средняя линия при time = 42 с) и с ненастроенным (fuzzy, верхняя линия при time = 42 с) и настроенным (fuzzy opt, нижняя линия при time = 42 с) нечетким регулятором на базе сети *Anfis*

Результаты исследования показали, что разработанный адаптивный нечеткий регулятор на базе сети *Anfis* обеспечивает заданное качество переходных процессов при возмущениях, задаваемых по углу несущего винта, которое существенно отличается в лучшую сторону от качества переходных процессов адаптивного нечеткого регулятора без оптимизации параметров. Настроенный адаптивный нечеткий регулятор на базе сети *Anfis* уменьшил перерегулирование в переходном процессе при максимальном возмущающем воздействии в четыре раза по сравнению с ненастроенным регулятором и в два раза по сравнению с ПИД-регулятором. Время переходного процесса сократилось в три раза по сравнению с ПИД-регулятором. Применение адаптивного нечеткого регулятора на базе сети *Anfis* в системе регулирования частоты вращения повышает качество регулирования частоты вращения силовой турбины и сокращает время переходного процесса регулирования.

Анализ полученных в результате исследования показателей качества разработанного адаптивного нечеткого регулятора управления частотой вращения

силовой турбины ВРД на базе сети *Anfis* позволяет сделать вывод о наличии адаптивных свойств и возможности надежной работы при взаимодействии с другими контурами управления. Сеть *Anfis* принимает решения, используя предшествующий опыт, что позволяет адаптироваться к изменениям в элементах системы управления, включая объект управления.

Выявленным недостатком разработанного адаптивного нечеткого регулятора на базе сети *Anfis* является ограничение по выбору функций принадлежности, допускающих дифференцирование (функция Гаусса, сигмоидные функции) и длительное время обучения с учителем, 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.

2.3 Новый авторский метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов.

2.3.1 Методы адаптации фаззификатора

Для повышения качества управления в условиях неполного или некорректного математического описания характеристик объекта управления и в качестве элемента системы управления для применения в бортовой авиационной аппаратуре предложено применение адаптивного нечеткого регулятора, построенного на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации. 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 метод синтеза 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, представленный обобщенной моделью №2 (см. рис.2.2), состоит из следующих элементов: фаззификатора, алгоритма адаптации, сумматоров, вычисляющих результат нечёткого вывода и дефаззификатора с применением метода разности площадей [8, 9].

На рис. 2.11 приведена предложенная структурная схема устройства адаптивного нечеткого регулятора (АНР). На структурной схеме входной сигнал АНР Δn_e – ошибка регулирования, выходной сигнал к дозатору топлива ВРД. В зависимости от желаемого характера переходного процесса в замкнутой системе управления к АНР по ошибке регулирования, в системе управления может быть реализован АНР по первой производной ошибки регулирования, по второй производной ошибки регулирования и т.д. В инженерной практике достаточно ограничиться совместной работой АНР по ошибке регулирования и по первой производной ошибки регулирования.

Преобразование четкой информации в нечеткую информацию выполнено на синглетонной базе. Под синглетоном понимается унимодальная функция принадлежности (терм) [7, 32] перемещающаяся в нормированном интервале синхронно с текущим значением лингвистической переменной.

При разработке адаптивного нечеткого регулятора предложено в элементах системы управления ввести процедуру адаптации фаззификатора.

Для придания адаптивных свойств фаззификатору нечеткого регулятора в качестве элемента системы управления введен адаптивный линейный элемент или искусственный линейный нейрон, содержащий сумматор, блок адаптации и элемент сравнения, охваченный обратной связью блоком алгоритма адаптации. На рис.2.11 это все элементы блока АФ, отмеченного пунктиром, за исключением фаззификатора Ф.

Элемент сравнения в цепи обратной связи сравнивает фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом Δ (сигнал Δ может быть ошибкой регулирования, первой производной ошибки регулирования, второй производной ошибки регулирования и т.д.). Алгоритм адаптации подстраивает

коэффициенты вектора входных сигналов (степени принадлежности) так, чтобы свести к нулю ошибку $\varepsilon = (\Delta - r)$ на выходе элемента сравнения.

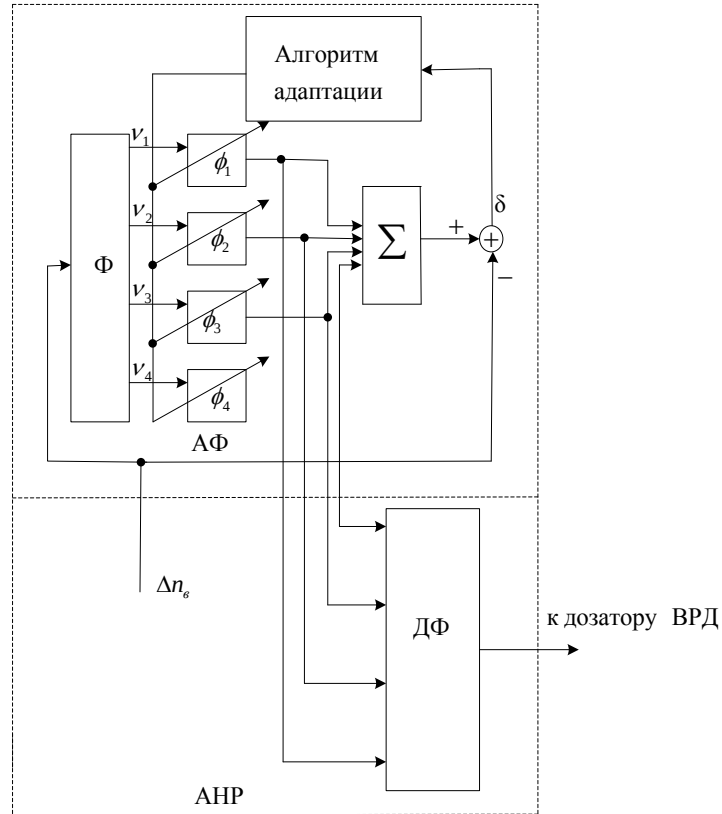


Рис.2.11. Устройство адаптивного нечеткого регулятора (АНР), где вход Δn_1 - ошибка регулирования, Φ – фаззификатор, $\Delta\Phi$ – дефаззификатор, $\Delta\Phi$ – адаптивный фаззификатор с фаззификатором Φ , степенями принадлежности активированных функций фаззификатора $v_1, \dots, v_4$, синапсами $\phi_1, \dots, \phi_4$

В результате адаптации происходит коррекция степеней принадлежности, где сумма текущих значений степеней принадлежности всегда меньше единицы и равна ошибке регулирования. Без включения сумматора, охваченного обратной связью блоком алгоритма адаптации, сумма степеней принадлежности активированных функций принадлежности всегда равна единице, что исключает адаптацию в фаззификаторе.

Из всего многообразия методов адаптации, обеспечивающих в алгоритме адаптации подстройку коэффициентов вектора входных сигналов (синапсы),

выбраны исходя из критерия минимального времени адаптации следующие [22]:

- метод наименьших квадратов (алгоритм Уидроу-Хоффа);
- модифицированный метод наименьших квадратов;
- метод последовательного обучения.

Далее более подробно рассмотрим выбранные методы адаптации фаззификатора с целью выбора оптимального решения для поставленной задачи.

2.3.1.1 Метод Уидроу-Хоффа для построения адаптивного нечеткого регулятора

Алгоритм адаптации искусственного нейрона Мак-Каллока и Питтсона, предложенный Уидроу-Хоффом реализует метод стохастической адаптации [109] и полностью подходит к построению адаптивного фаззификатора нечеткого регулятора. Суть метода заключается в следующем. Уидроу и Хофф модифицировали персептронный алгоритм Ф. Розенблатта, заменив пороговую функцию сигмоидной функцией активации. Их модели Адалин (Adaline (Adaptive Linear Element), с одним выходным нейроном) и Мадалин (Madaline, multi-layered networks, много выходных нейронов) получили широкое распространение. Они доказали, что сеть при определенных условиях будет сходиться к любой функции, которую она может реализовать. Процедура Уидроу-Хоффа разработана применительно к «черному ящику», в котором между входами и выходами существуют только прямые связи. Процедура обучения персептрона Мадалин состоит в подстройке весов внутренних связей между нейронами до тех пор, пока не установится требуемое соотношение между входными и выходными векторами. Процесс адаптации состоит из двух чередующих фаз.

В первой фазе на входе персептрона задается входной вектор, координатами которого являются входные элементы, например ошибки регулирования, а на выходе – необходимый выходной вектор, координатами которого являются выходные элементы, например управляющие воздействия. Далее веса всех свя-

зей, соединяющих активные входы и выходы, увеличиваются на малую величину δ .

Во второй фазе на входе формируется тот же входной вектор, однако теперь самому «черному ящику» предоставлено право решать, какой вектор сформировать на выходе. При этом должно соблюдаться следующее правило: выход активизируется только тогда, когда сумма весов его связей с активными входами положительна. После этого веса всех связей, соединяющих активные входные и выходные элементы, уменьшаются на величину δ . Если сеть выработала правильный выходной вектор, то эти уменьшения весов в точности компенсируют их увеличение, произведенные в первой фазе, поскольку в обеих фазах активны одни и те же пары вход-выход. Если же сеть выработала не тот выходной вектор, который необходим в соответствии с поставленной задачей, то изменение весов в первой фазе сохраняется. При реализации алгоритма обучения персептрона Адалин появляется отличие от классического персептронного алгоритма в четвертом шаге, где используются непрерывные сигналы вместо бинарных сигналов.

Математическое обоснование алгоритма Уидроу-Хоффа.

$$\varepsilon^2 = (\Delta - r)^2, \quad (2.2)$$

где:

$$r = \sum_{i=1}^n v_i \phi_i, \quad (2.3)$$

Для решения данной безусловной оптимизационной задачи используем градиентный метод или дельта-метод. В этом методе следующая $(k + 1)$ – итерация для значения i -го весового коэффициента w_i находится по формуле:

$$\phi_i(k + 1) = \phi_i(k) - \left(\frac{d(\varepsilon)^2}{d v_i} \right)_k C, \quad (2.4)$$

где:

C – положительная константа.

Из формулы (2.4) с учетом (2.2 и 2.3) следует окончательное выражение для алгоритма адаптации:

$$\phi_i(k+1) = \phi_i(k) + 2C\varepsilon(k)v_i(k), \quad (2.5)$$

где: $2C$ – скорость обучения нейрона, определяемая скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации.

Достоинством алгоритма адаптации Уидроу-Хоффа является отсутствие ограничения на вид функций принадлежности (терм) и их расположение в нормированном интервале, поскольку процедура Уидроу-Хоффа разработана применительно к «черному ящику». В «черном ящике» между входами и выходами существуют только прямые связи и веса внутренних связей между нейронами подстраиваются до тех пор, пока не установится требуемое соотношение между входными и выходными векторами.

Недостатком является сравнительно низкое быстродействие из-за большого числа итераций при малом выбранном шаге (переменном шаге). Процесс обучения может длиться также долго, если значение допустимой ошибки выбрано неверно. При выборе большего шага с целью повышения быстродействия адаптации процесс стабилизации может быть завершен быстро, но при этом значения коэффициентов чаще всего бывают неоптимальными, также возможна потеря устойчивости из-за невозможности стабилизации коэффициентов и завершения процесса обучения. Отмеченные недостатки не отвечают требованиям к системе управления, работающей в реальном времени. Данный метод применим полностью для подстройки степеней принадлежности фаззификатора.

Устранить отмеченные недостатки возможно на основе применения модифицированного метода наименьших квадратов.

2.3.1.2 Модифицированный метод наименьших квадратов для построения адаптивного нечеткого регулятора

Для повышения быстродействия и обеспечения устойчивости процесса управления применяется алгоритм адаптации к объекту управления с переменными параметрами, основанный на модификации метода наименьших квадратов (МНК) [37]. Данный алгоритм в отличие от алгоритма Уидроу-Хоффа рассчитывает синаптические веса w_{kj} нейрона за одну итерацию из условия линейных терм-множеств фаззификатора. После нормализации терм-множества в диапазоне от минус 1 до плюс 1 терм-множество разбивается, например, на пять равных подинтервалов, как показано на рис. 2.12 при отсутствии интегрального элемента в регуляторе, или на четыре подинтервала, как показано на рис. 2.13 при наличии интегрального элемента в регуляторе:

$$Y_1 \in [-1; -0,6];$$

$$Y_2 \in [-0,6; -0,2];$$

$$Y_3 \in [-0,2; +0,2];$$

$$Y_4 \in [+0,2; +0,6];$$

$$Y_5 \in [+0,6; +1].$$

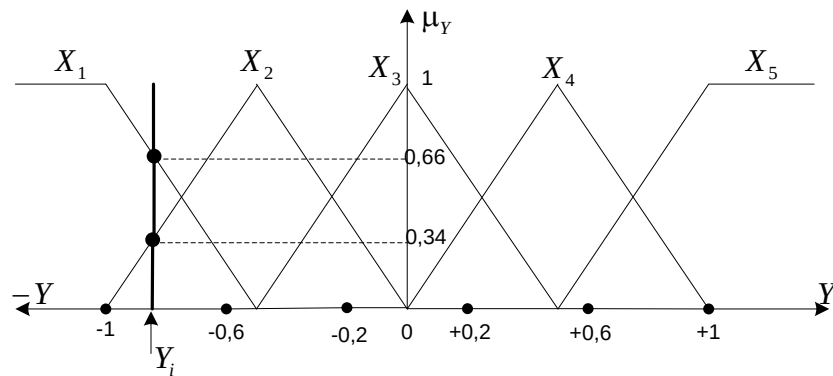


Рис. 2.12. Разбиение нормированного интервала на пять подинтервалов

Далее применяется метод наименьших квадратов к функционалу F .

$$F = (h_1 X_1 + h_2 X_2 + h_3 X_3 + h_4 X_4 + h_5 X_5 - Y_i)^2.$$

где h_i — весовые коэффициенты (синапсы).

После определения производных от функции F по каждому весовому коэффициенту (синапсу) на каждом из пяти интервалов, полученные производные приравниваются к нулю:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial h_1} &= 2(h_1 X_1 + h_2 X_2 + h_3 \cdot 0 + h_4 \cdot 0 + h_5 \cdot 0 - Y_i) = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_2} &= 2(h_1 X_1 + h_2 X_2 + h_3 X_3 + h_4 \cdot 0 + h_5 \cdot 0 - Y_i) = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_3} &= 2(h_1 \cdot 0 + h_2 X_2 + h_3 X_3 + h_4 X_4 + h_5 \cdot 0 - Y_i) = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_4} &= 2(h_1 \cdot 0 + h_2 \cdot 0 + h_3 X_3 + h_4 X_4 + h_5 X_5 - Y_i) = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_5} &= 2(h_1 \cdot 0 + h_2 \cdot 0 + h_3 \cdot 0 + h_4 X_4 + h_5 X_5 - Y_i) = 0 .
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Преобразование уравнений (2.6) позволяет получить:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial h_1} &= h_1 X_1 + h_2 X_2 - Y_i = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_2} &= h_1 X_1 + h_2 X_2 + h_3 X_3 - Y_i = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_3} &= h_2 X_2 + h_3 X_3 + h_4 X_4 - Y_i = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_4} &= h_3 X_3 + h_4 X_4 + h_5 X_5 - Y_i = 0 ; \\
 \frac{\partial F}{\partial h_5} &= h_4 X_4 + h_5 X_5 - Y_i = 0 .
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Весовые коэффициенты (синапсы) из уравнений (2.7) могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{Y_i - h_2 X_2}{X_1} ; \\
 h_2 &= \frac{Y_i - h_1 X_1 - h_3 X_3}{X_2} ; \\
 h_3 &= \frac{Y_i - h_2 X_2 - h_4 X_4}{X_3} ;
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$h_4 = \frac{Y_i - h_3 X_3 - h_5 X_5}{X_4};$$

$$h_5 = \frac{Y_i - h_4 X_4}{X_5}.$$

В формулах (2.8) параметр Y_i – есть текущее значение переменной величины, подаваемое на вход фаззификатора (синглтон).

При первом отсчете при запуске нечеткого регулятора начальные значения синапсов задаются случайным образом, а в дальнейшем за исходные принимаются значения синапсов предыдущего отсчета. При этом на каждом новом шаге расчета значения синапсов (в зависимости от того какому интервалу принадлежит желаемое значение Y) автоматически подстраиваются согласно уравнениям (2.8) под новые значения. Если отклонение вышло за нормированный диапазон, то $w_1 = Y_1$ и $w_5 = Y_5$.

Если число терм фаззификатора не равно числу подинтервалов разбиения нормированного интервала, то формулы (2.8) неприменимы и необходимо их скорректировать согласно числу интервалов разбиения. После выполнения данного требования расчет синапсов выполняется за один цикл, что повышает быстродействие настройки синапсов на два порядка. .

Модифицированный алгоритм наименьших квадратов применим для линейных терм фаззификатора, основания которых могут быть разными и могут располагаться в нормированном интервале не равномерно. Для нелинейных терм метод наименьших квадратов не оптимален.

Ограничение на применение линейных терм фаззификатора является недостатком метода.

Устранения данного недостатка возможно на основе применения метода последовательного обучения.

2.3.1.3 Метод последовательного обучением для построения адаптивного нечеткого регулятора

Данный метод [88] относится к методам последовательной идентификации линейных систем в реальном времени, который основан на принципе обучения с моделью. В методе реализуется модель импульсной характеристики. Аналогично методам стохастической аппроксимации, метод последовательного обучения не дает оценки параметров по методу наименьших квадратов на различных последовательных шагах, вследствие чего сходимость этого метода несколько ниже, чем у метода последовательной регрессии. При этом оценки постепенно сходятся (в среднем) к истинным значениям параметров.

Поскольку метод последовательного обучения отличается от метода стохастической аппроксимации характеристиками сходимости, этот метод удобно применять для процессов с медленно изменяющимися параметрами. Основное преимущество метода последовательного обучения в сравнении с методом стохастической аппроксимации характеристиками сходимости и с другими методами обучения состоит в простоте алгоритма адаптации.

В методе последовательного обучения рассматривается линейная система со случайным входом $u(t)$, выходом $x(t)$ и импульсной характеристикой $g(t)$. Связь между входом и выходом системы задается интегралом свертки, который для нулевых начальных условий записывается в виде:

$$x(t) = \int_0^t g(\tau) u(t - \tau) d\tau, \quad (2.9)$$

где: $u(t - \tau)$ – измеряемая величина.

Дискретная форма интеграла свертки имеет вид:

$$x_j = \sum_{i=1}^N g_i u_{j-i}, \quad (2.10)$$

Определение импульсной характеристики g_i выполняется путем итерационных вычислений величин весовых коэффициентов:

$$h_1^{(j)}, h_2^{(j)}, \dots, h_N^{(j)}, \forall j = N + 1, N + 2,$$

которые должны, соответственно, приближаться к $g_1 \dots g_N$ в уравнении (2.10), где j обозначает номер итерации. Тогда оценка выхода нейрона x_{jm} при использовании $h_i^{(j)}$ вычисляется по аналогии с (2.10):

$$x_{jm} = \sum_{i=1}^N h_i^{(j)} u_{j-i}, \quad (2.11)$$

После введения обозначения

$$g = [g_1, \dots, g_N]^T;$$

$$h_j = [h_1(j), \dots, h_N(j)]^T;$$

$$u_j = [u_{j-1}, \dots, u_{j-N}]^T.$$

Выражения (2.10) и (2.11) могут быть преобразованы к виду:

$$x_j = g^T u_j;$$

$$x_{jm} = h_j^T u_j.$$

Далее определяется разность между x_j и x_{jm}

Для перестановки векторных сомножителей применим операцию обратного транспонирования

$$x_j - x_{jm} = (g - h_j)^T u_j = u_j^T (g - h_j) = u_j^T \Delta h_j.$$

Полученный вектор $\Delta h = h_{j+1} - h_j$ используется для коррекции вектора со следующей идентификацией h_{j+1} относительно h_j с учетом ошибки $(x_j - x_{jm})$ в оценке x_j .

Полагая, что

$$\Delta h_j = (x_j - x_{jm}) \frac{u_j}{u_j^T u_j},$$

где: $j = 1, 2, \dots$;

рекуррентная формула для определения h_{j+1} имеет вид:

$$h_{j+1} = h_j + (x_j - x_{jm}) \frac{u_j}{u_j^T u_j}, \quad (2.12)$$

Для запуска процедуры оценки ошибки $(x_j - x_{jm})$ согласно (2.11) при $j=1$ следует подставить в (2.12) значение $x_{jm} = 0$.

После введения в (2.12) коэффициента коррекции ошибки C , окончательное выражение для рекуррентной формулы имеет вид:

$$h_{j+1} = h_j + C(x_j - x_{jm}) \frac{u_j}{u_j^T u_j}, \text{ при } 0 < C < 2 \quad (2.13)$$

Докажем возможность выполнения только одной итерации на одном шаге адаптации на примере применения рекуррентной формулы (2.13) в адаптивном фаззификаторе.

При этом было принято допущение, что терм-множество фаззификатора такое, что при текущем отклонении (ошибке регулирования) $\Delta u_j = 0,4$ активизировались термы «Норма» (Н) и «Положительное среднее» (ПС) с формированием степеней принадлежности $\mu_H = 0,4$ и $\mu_{ПС} = 0,6$.

Запишем выражение (2.13) в новых обозначениях при допущении что $C = 1$ запишется:

$$h_{j+1} = h_j + \frac{C \varepsilon_j \begin{bmatrix} \mu_H \\ \mu_{ПС} \end{bmatrix}}{\mu_{Об}^2 + \mu_{Ос}^2 + \mu_H^2 + \mu_{ПС}^2 + \mu_{ПБ}^2},$$

где $\varepsilon = \Delta u_j - (h_H \mu_H + h_{ПС} \mu_{ПС})$.

Расчет первой итерации:

$$\begin{bmatrix} h_H^{(1)} \\ h_{ПС}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_H^{(0)} \\ h_{ПС}^{(0)} \end{bmatrix} + \frac{(\Delta u_j - h_H^{(0)} \cdot \mu_H - h_{ПС}^{(0)} \cdot \mu_{ПС}) \begin{bmatrix} \mu_H \\ \mu_{ПС} \end{bmatrix}}{[\mu_H]^2 + [\mu_{ПС}]^2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{(0,4) \begin{bmatrix} 0,4 \\ 0,6 \end{bmatrix}}{0,4^2 + 0,6^2} = \begin{bmatrix} 0,3077 \\ 0,4615 \end{bmatrix}$$

Расчет второй итерации:

$$\begin{bmatrix} h_H^{(2)} \\ h_{ПС}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_H^{(1)} \\ h_{ПС}^{(1)} \end{bmatrix} + \frac{(\Delta u_j - h_H^{(1)} \cdot \mu_H - h_{ПС}^{(1)} \cdot \mu_{ПС}) \begin{bmatrix} \mu_H \\ \mu_{ПС} \end{bmatrix}}{\mu_H^2 + \mu_{ПС}^2} = \begin{bmatrix} 0,3077 \\ 0,4615 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{(0,4 - 0,3077 \cdot 0,4 - 0,4615 \cdot 0,6) \cdot \begin{bmatrix} 0,4 \\ 0,6 \end{bmatrix}}{0,4^2 + 0,6^2} = \begin{bmatrix} 0,3077 \\ 0,4615 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3077 \\ 0,4615 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, потребовалась одна итерация на одном шаге адаптации, вторая итерация приведена для доказательства подтверждения повторяемости результата.

В ходе исследования математически доказано, что адаптация фаззификатора методом последовательного обучения может быть выполнена за одну итерацию, соответственно за один цикл работы цифрового регулятора.

Метод последовательного обучения удобно применять для процессов с медленно изменяющимися параметрами. Изменение характеристик объекта управления в процессе его работы относится к медленно изменяющимся процессам.

Основное преимущество метода последовательного обучения в сравнении с методом стохастической аппроксимации характеристиками сходимости и с другими методами обучения состоит в простоте алгоритма адаптации.

При реализации метода последовательного обучения возможно использование как линейных, так и нелинейных терм [33].

2.3.1.4 Сопоставление методов адаптации

Анализ разработанных методов адаптации для реализации в адаптивном линейном элементе адаптивного нечеткого регулятора показал, что для встроенных автоматических систем управления, работающих в реальном времени метод Уидроу-Хоффа неприменим вследствие длительной итерационной процедуры обучения адаптивного линейного элемента от нескольких секунд до десятков минут в зависимости от заданной точности.

Модифицированный метод наименьших квадратов накладывает ограничения на вид терм фаззификатора.

Метод с последовательным обучением предпочтителен в связи с его высоким быстродействием и возможностью использования терм любого вида, что дает дополнительную свободу в задании желаемых свойств регулятора при его синтезе. Высокое быстродействие метода позволяет выполнить процедуру адаптации за один цикл работы цифрового АНР 20 мс.

При разработке адаптивного нечеткого регулятора предложено в элементах системы управления ввести процедуру адаптации методом последовательного обучения, обеспечивающим простоту алгоритма адаптации фаззификатора и высокую скорость адаптации.

2.3.2 Пример синтеза адаптивного нечеткого регулятора с применением адаптивного фаззификатора для обобщенной модели № 2

На основе нового предлагаемого метода синтеза адаптивных систем управления для различных типов ВРД, предложенного выше, и выбранного метода адаптации, была разработана и апробирована система адаптивного нечеткого управления параметрами ВРД на основе обобщенной модели адаптивного нечеткого управления № 2 (см. рис. 2.2).

Разработанный адаптивный нечеткий регулятор является нелинейным аппроксиматором и допускает статическую ошибку. Статическая ошибка минимизируется введением «нулевой» термы. Исключение статической ошибки сигнал с выхода нечеткого регулятора может быть с помощью ПИ-регулятора дозатора с обратной связью или включением форсирующего звена в дозаторе без обратной связи.

В качестве фаззификатора адаптивного нечеткого регулятора принято терм-множество, содержащее четыре линейных терма: отклонение отрицательное большое ОБ, отрицательное малое ОМ, положительное малое ПМ, положительное большое ПБ, представленных на рис.2.13.

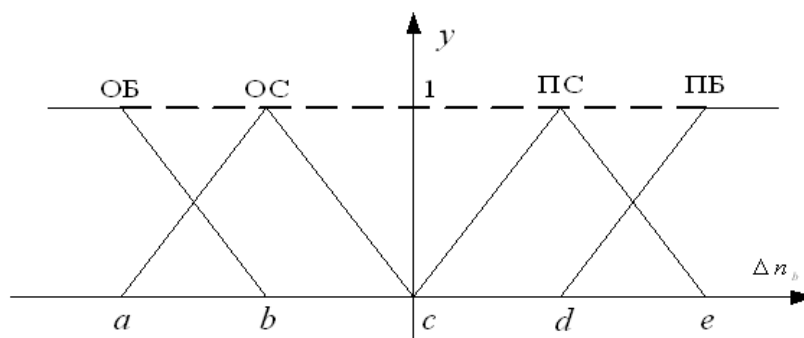


Рис. 2.13. Терм-множество фаззификатора нечеткого регулятора

Математическое описание линейных терм фаззификатора приведено на рис.2.14.

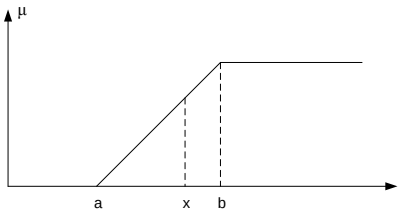
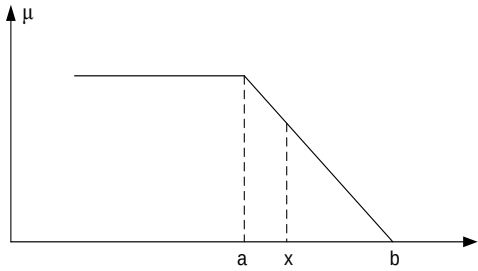
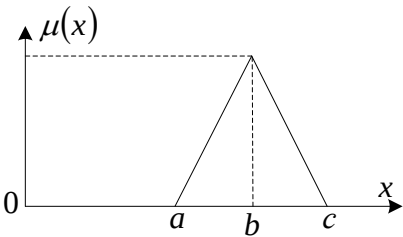
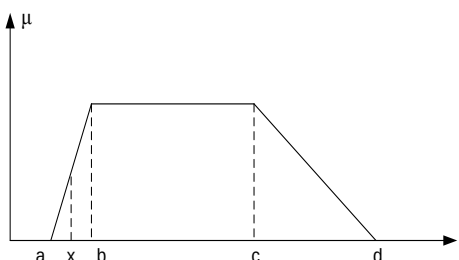
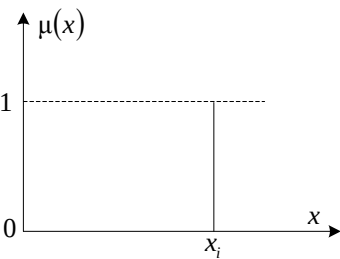
ФП	График	Аналитическое выражение
γ		$trn(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } (x \leq a); \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } (a \prec x \leq b); \\ 1, & \text{if } (x \succ b); \end{cases}$
L		$trn(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x \leq a); \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{if } (a \prec x \leq b); \\ 0, & \text{if } (x \succ b); \end{cases}$
T		$trn(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{if } (x \leq a); \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } (a \prec x \leq b); \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } (b \leq x \prec c); \\ 0, & \text{if } (x \geq c). \end{cases}$
П		$trn(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & \text{if } (x \leq a); \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } (a \prec x \leq b); \\ 1, & \text{if } (b \leq x \prec c); \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{if } (c \leq x \prec d); \\ 0, & \text{if } (x \geq d); \end{cases}$
Синглетон		$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x_i = x; \\ 0, & x_i \neq x \end{cases}$ $\mu_A(x) = \sin gl(x - x_i)$

Рис. 2.14. Линейные функции принадлежности

Преобразование четкой информации в нечеткую информацию выполнено на синглетонной базе. Под синглетоном понимается унимодальная функция принадлежности (терм) перемещающаяся в нормированном интервале синхронно с текущим значением лингвистической переменной.

При разработке адаптивного нечеткого регулятора предлагается введение процедуры адаптации фаззификатора, при которой сводится к минимуму квадрат ошибки регулирования методом последовательного обучения (2.13).

Для придания адаптивных свойств фаззификатору нечеткого регулятора дополнительно вводится сумматор, охваченный обратной связью блоком алгоритма адаптации (см. рис.2.11). 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.

В результате адаптации происходит коррекция степеней принадлежности, где сумма текущих значений степеней принадлежности всегда меньше единицы и равна ошибке регулирования. Без включения адаптации сумма степеней принадлежности активированных функций принадлежности всегда равна единице.

Адаптация фаззификатора выполняется по рекуррентной формуле аналогично (2.13).

Предложенный практический подход к синтезу адаптивного нечеткого регулятора, представленного моделью №2 (см. п. 2.1), с применением адаптивного фаззификатора и дефаззификатора на базе метода разности площадей, обеспечивает реализуемость адаптивного нечеткого регулятора 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 адаптивного нечеткого регулятора при его синтезе. Для упрощения этого процесса

предложена инженерная методика синтеза и настройки адаптивного нечеткого регулятора.

2.3.3 Анализ функционирования адаптивного нечеткого регулятора на основе адаптивного фаззификатора и дефаззификатора

Целью исследования разработанной структурной схемы встроенной системы управления, работающей в реальном времени является подтверждение возможности замены классического регулятора адаптивным нечетким регулятором.

Для проверки работоспособности разработанного адаптивного нечеткого регулятора на основе адаптивного фаззификатора и дефаззификатора и сравнения результатов моделирования с ПИ- и ПИД-регуляторами составлена математическая модель исследуемой системы автоматического регулирования, которая включает линейную модель ТРДД (см. приложение Б), линейную модель электрогидравлической исполнительной части, модель электронной части, включающую контур ограничения ускорения частоты вращения ротора КВД ТРДД, и контур регулирования частоты вращения ротора вентилятора. Модели двигателя и электрогидравлической части также рассчитываются с шагом интегрирования 0,004 с, модель электронной части рассчитывается с шагом 0,02 с.

Для реализации поставленной цели подтверждения возможности замены классического регулятора адаптивным нечетким регулятором была исследована динамика работы ТРДД как объекта управления при изменении положения рычага управления двигателем (РУД) с режима малого газа ($\alpha_{\text{РУД}} = \alpha_{\text{РУД}}^{\text{МГ}}$) до режима взлет ($\alpha_{\text{РУД}} = \alpha_{\text{РУД}}^{\text{ВЗЛЕТ}}$) за время 0,5с.;

В табл.2.1 приведены условные обозначения параметров, приведенных на осциллограммах переходных процессов ниже по тексту.

На рис.2.15...рис. 2.20 приведены осциллограммы изменения параметров ТРДД при переводе рычага управления двигателем от значения $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{МГ}}$ до значения $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{ВЗЛЕТ}}$ на земле ($H = 0$ км).

Таблица 2.1 – Обозначение параметров на графиках.

Обозначение	Обозначение на рис.	Параметр
$\alpha_{руд}$	$Lrud$	Угол поворота рычага управления двигателем, град
n_B	Nb	Частота вращения ротора вентилятора, об/м
$n_B^{уст}$	Nby	Программное значение n_B , об/м
G_T	Gt	Фактическое значение расхода топлива, кг/ч
G_T^{ac}	$Gtac$	Программное значение расхода топлива на сбросе, кг/ч
G_T^{an}	$Gtap$	Программное значение расхода топлива на приемистости, кг/ч
$\dot{n}_{ВД}$	$Pnbd$	Фактическое значение ускорения частоты вращения ротора КВД, об/м/с
$\dot{n}_{ВД}^{ac}$	$Pnbdac$	Программное значение ускорения частоты вращения ротора КВД на сбросе, об/м/с
$\dot{n}_{ВД}^{an}$	$Pnbdap$	Программное значение ускорения частоты вращения ротора КВД на приемистости, об/м/с
$n_{ВД}$	Nbd	Частота вращения ротора КВД, об/м
$n_{ВД}^{уст}$	$Nbdy$	Программное значение частоты вращения ротора КВД, об/м

На рис.2.15 показано изменение положения РУД.

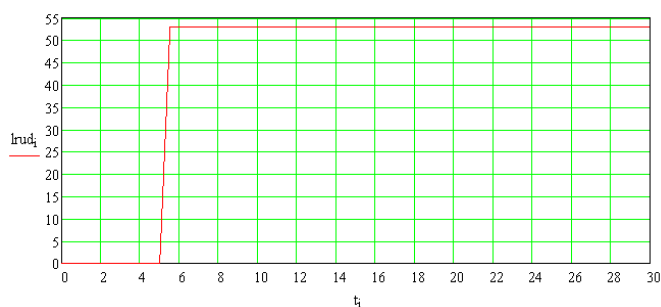


Рис.2.15. Осциллограмма изменения во времени положения РУД

На рис.2.16 приведены осциллограммы изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора вентилятора ТРДД.

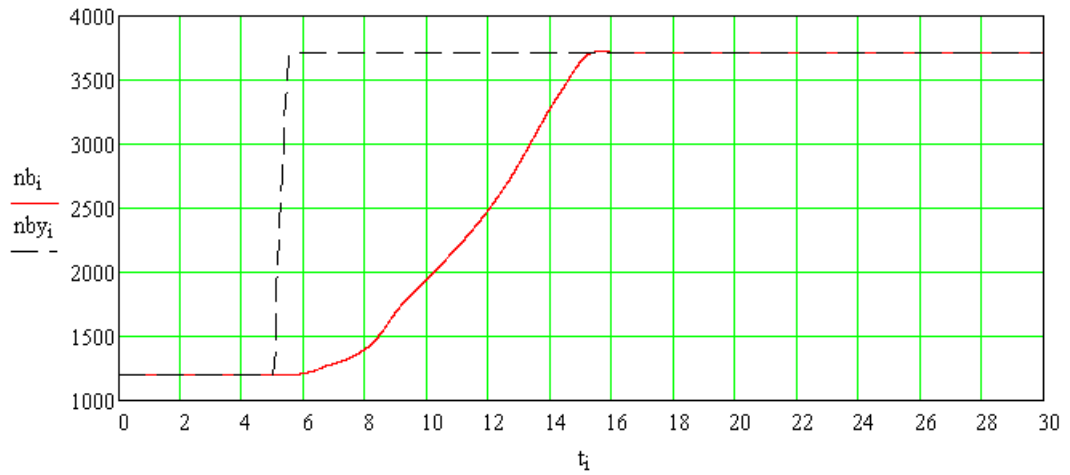


Рис. 2.16. Осциллограммы программного и текущего значений частоты вращения ротора вентилятора ТРДД

На рис.2.17 приведены осциллограммы изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора КВД ТРДД.

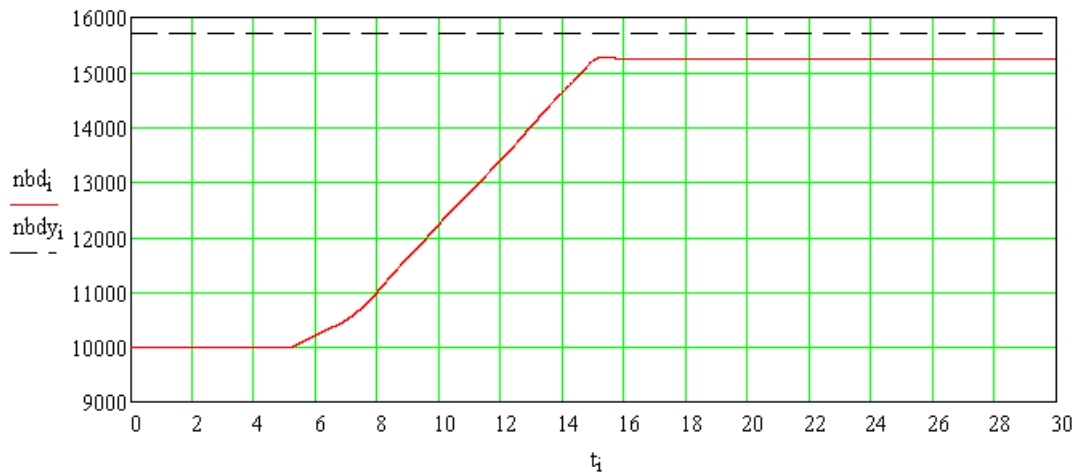


Рис.2.17. Осциллограммы программного и текущего значений частоты вращения ротора КВД ТРДД

На рис. 2.18 приведены осциллограммы изменений программного и текущего значений ускорения частоты вращения ротора КВД ТРДД.

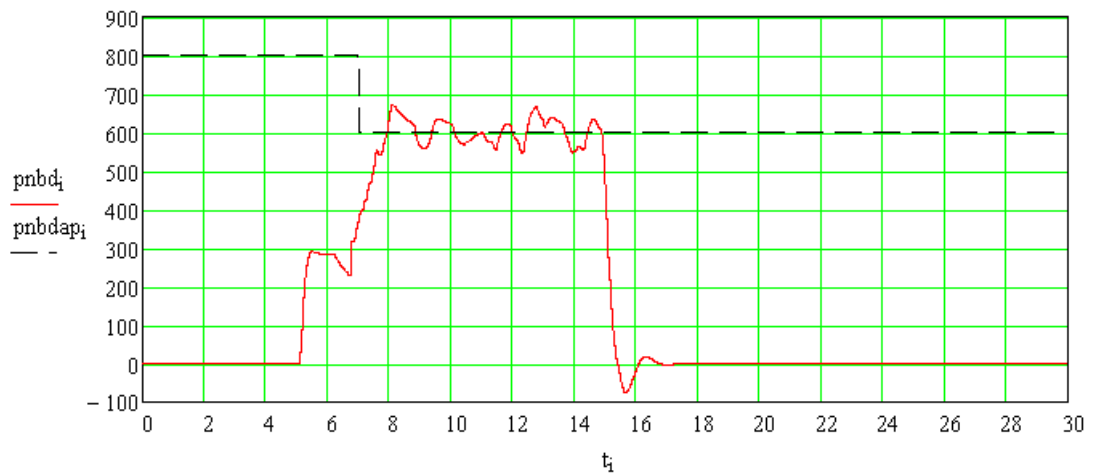


Рис. 2.18. Осциллограммы изменений программного и текущего значений ускорения частоты вращения ротора КВД ТРДД

На рис.2.19 приведены осциллограммы изменений программного и текущего значений расхода топлива ТРДД.

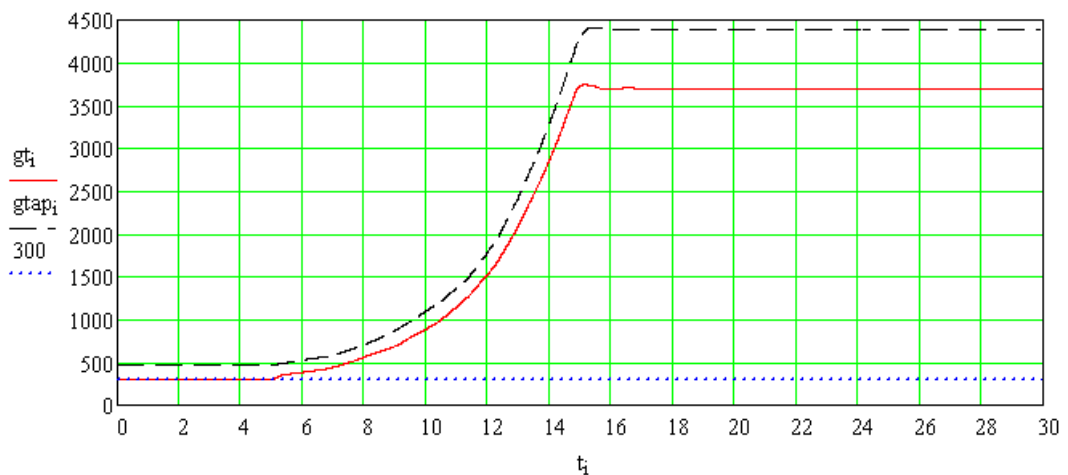


Рис.2.19. Осциллограммы программного и текущего значений расхода топлива ТРДД

Анализ приведенных осциллограмм (см. рис.2.15....рис.2.19) подтвердил, что параметры переходных процессов по параметрам частот вращения роторов двигателя апериодические, соответствуют требованиям авиационных правил, на установившемся режиме работы отсутствует ошибка регулирования по поддержанию величины задающего параметра, что подтверждает правомочность замены четкого ПИ регулятора адаптивным нечетким регулятором.

2.3.4 Анализ адаптивных свойств адаптивного нечеткого регулятора параметров ВРД

Для анализа адаптивных свойств адаптивного нечеткого регулятора проведена проверка работы регулятора в замкнутой системе с объектом управления, характеризующимся некорректным математическим описанием (стохастический объект). Некорректное математическое описание объекта управления имитировалось изменением статической характеристики двигателя по расходу топлива относительно расчетной характеристики.

Измененная статическая характеристика двигателя по расходу топлива приведена на рис. 2.20 (синяя пунктирная линия).



Рис. 2.20. Статические характеристики двигателя по расходу топлива

На рис.2.21...рис. 2.24 представлены осциллограммы переходных процессов при работе системы на примере контура управления частотой вращения ротора вентилятора. Красной линией обозначены параметры, полученные с исходной статической характеристикой в математическом описании объекта управления, а синей пунктирной линией — с измененной статической характеристикой. Ступенчатое возмущение подавалось путем мгновенного увеличения программного значения $n_{в}^{уст}$ на величину примерно 1%. Как видно из рис.2.21 и

рис. 2.23, при одних и тех же значениях частоты вращения ротора КВД, соответствующие величины расхода топлива различные (около 1800 ед при исходной и 1000 ед при измененной статической характеристике).

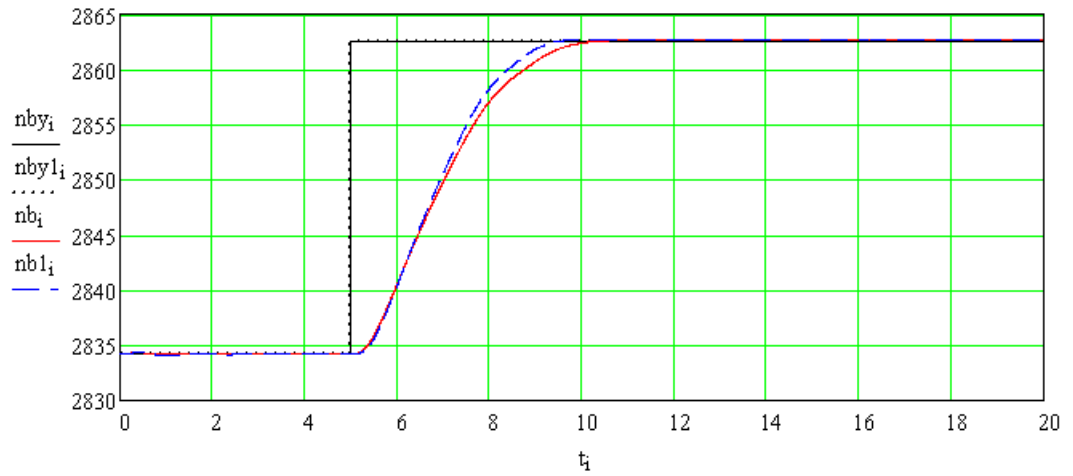


Рис.2.21. Осциллограммы переходного процесса при изменении частоты вращения ротора вентилятора при корректном и некорректном математическом описании объекта

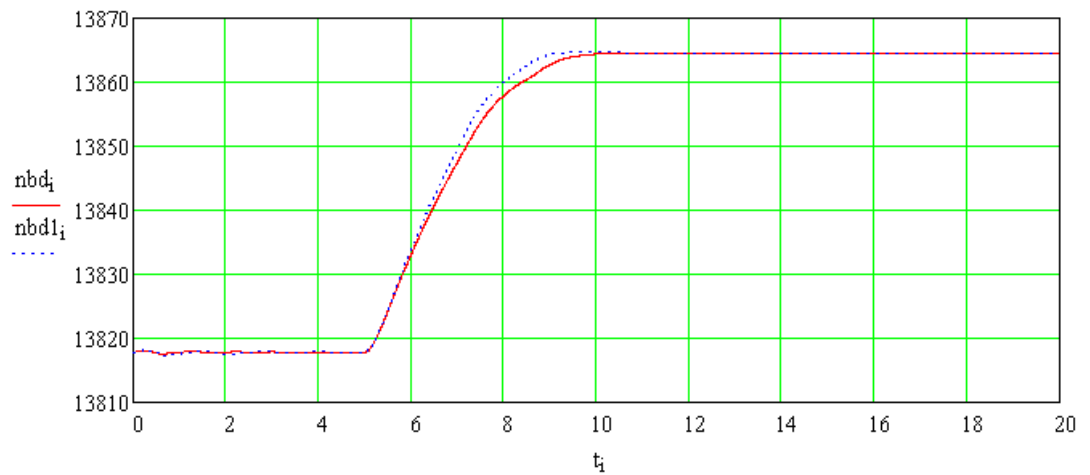


Рис.2.22. Осциллограммы переходного процесса при изменении частоты вращения ротора КВД при корректном и некорректном математическом описании объекта

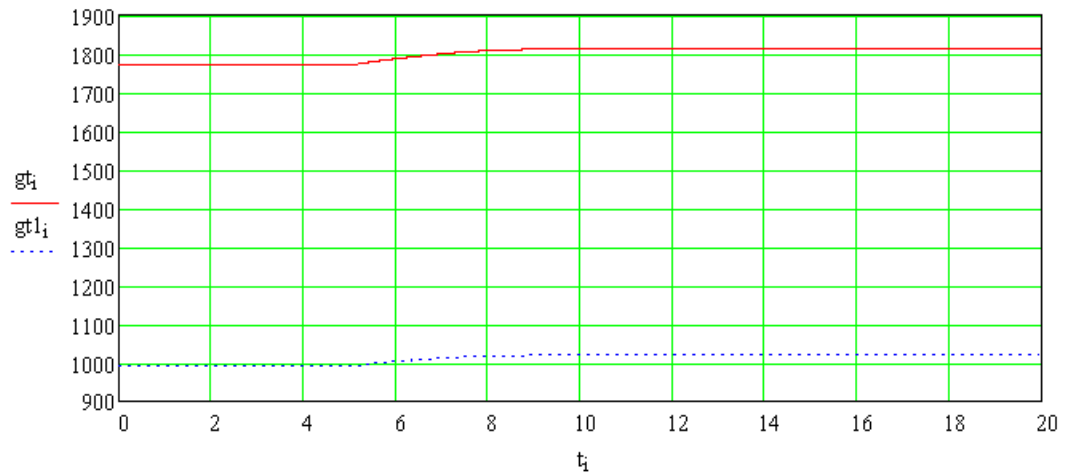


Рис.2.23. Осциллограммы переходного процесса при изменении расхода топлива двигателя при корректном и некорректном математическом описании объекта

При некорректном математическом описании объекта управления (при изменении статической характеристики двигателя по расходу топлива) качество управления контуром управления частотой вращения ротора вентилятора не изменилось как на установившихся режимах, так и в динамике.

Как показали проведенные исследования, спроектированный нечеткий регулятор частоты вращения вентилятора ТРДД обеспечивает заданное качество управления, парирует изменения характеристик двигателя при использовании неполного математического описания, в частности – неучтенном при проектировании изменении характеристик двигателя по ресурсу. Адаптивный нечеткий регулятор парирует контролируемое и неконтролируемое изменение параметров объекта регулирования в условиях воздействия возмущающих факторов, например, при задуве ветра со стороны сопла ТРДД при рулежке самолета. По характеру переходных процессов регулирования можно сделать вывод о достаточном для надежной работы запасе устойчивости системы (50% по амплитуде и 60 градусов по фазе). Все переходные процессы при увеличении и снижении режима работы двигателя, а так же переходный процесс реакции системы на ступенчатое возмущение имеют апериодический характер. Переходные процессы при увеличении режима работы двигателя приведены выше, при снижении режима работы двигателя – приведены в приложении Г.

Переходные процессы изменения внутренних параметров адаптивного нечеткого регулятора управления частотой вращения вентилятора ТРДД, иллюстрирующие анализ адаптивности, приведены в приложении Д.

2.4 Пример синтеза адаптивного нечеткого регулятора позиционирования дозатора топлива

2.4.1 Синтез адаптивного нечеткого регулятора расхода топлива в замкнутой системе управления в условиях априорной определенности параметров объекта управления

В эксплуатируемых двигателях управление расходом топлива в камеру сгорания ВРД осуществляется дозирующим устройством, представляющим собой специальным образом профилированное окно, через которое дозируется топливо при постоянном перепаде давления топлива на этом окне. Дозирующий кран (дозировочная игла) дозатора приводится в движение гидроцилиндром. Регулирование расхода топлива в камеру сгорания заключается в позиционировании гидроцилиндра дозирующего крана с заданной точностью.

Гидроцилиндр, приводящий в движение дозирующий кран, в системе управления ВРД является отдельным объектом управления. Помимо управления дозированием топлива, гидроцилиндры в ВРД используются для управления механизацией компрессора двигателя, для управления охлаждением двигателя, для управления втулкой ВВ ТВД и для других целей в зависимости от назначения двигателя.

Позиционирование гидроцилиндров в системах управления представляет собой важную народнохозяйственную задачу, поскольку гидроцилиндры широко применяются на транспорте, в робототехнике и во многих других областях промышленности. В связи этим задача позиционирования гидроцилиндров важна.

Позиционирование гидроцилиндра дозирующего крана ВРД чаще всего на практике выполняется электрогидравлическим исполнительным механизмом типа «сопло-заслонка», электрическая часть которого представляет собой элек-

тромагнитную систему, которая при постоянном количестве витков катушки и наличии тока, протекающего через катушку, создает механическую силу, прикрывающую заслонку над соплом и тем самым изменяющую управляющее давление электрогидравлического исполнительного механизма, приводящее в движение гидроцилиндр [33, 44].

Один из вариантов принципиальной схемы гидромеханической части системы управления гидроцилиндром дозатора представлен в Приложении В. К элементам системы управления относятся электрогидравлический преобразователь типа ПС-7, управляющий усилительный золотник и силовой гидроцилиндр с поршнем привода дозирующего крана.

Математическое описание гидромеханической части дозатора, вывод передаточной функции дозатора приведены в Приложении В.

Передаточная функция гидромеханической части контура управления дозирующего устройства определяется как отношение изменения угла, соответствующего положению дозирующего крана, к изменению управляющего тока. Для получения передаточной функции необходимо ввести дополнительное уравнение между углом поворота датчика и величиной хода дозатора:

$$\Delta \alpha_{\partial u} = K_{\alpha} \Delta x_{\partial u}$$

Тогда передаточная функция гидромеханической части контура управления дозирующего устройства, с учетом инерционности перемещения золотника с постоянной времени T_z , примет вид:

$$W_{zm} = \frac{\Delta \alpha_{\partial u}}{\Delta J_{GT}} = \frac{K_{zm}}{p(T_z p + 1)},$$

где:

$$K_{zm} = K_z \cdot K_x \cdot K_{\alpha}.$$

Дозатор без обратной связи обладает астатическим свойством.

Передаточная функция дозирующего устройства без учета инерционности золотника с введенным форсирующим звеном с передаточной функцией $(Tp + 1)$, имеет вид:

$$W(p) = (Tp + 1) \frac{K_{гм}}{p}.$$

Передаточная функция дозатора, охваченного единичной отрицательной обратной связью, с помощью формулы встречно-параллельной коррекции, имеет вид:

$$\Phi(p) = \frac{1}{\frac{1}{K_{гм}} p + 1} = \frac{1}{T_{дз} p + 1}.$$

Такой вариант управления дозирующим устройством, охваченного единичной отрицательной обратной связью, позволяет управлять параметрами двигателя ПИ-регулятором. Охват обратной связью одного элемента системы управления, характеризующегося интегральными свойствами, превращает этот элемент в фильтр. Это необходимо для того, что бы исключить совместную работу нескольких элементов системы управления, характеризующихся интегральными свойствами, соединенных последовательно и потенциально неустойчивых по фазе.

Однако, изменение параметров дозатора, вызванное износом деталей дозирующего крана, увеличением текучести топлива с ростом его температуры и т.д., вызывает нелинейность статической характеристики дозатора.

В связи с тем, что гидроцилиндр представляет собой недетерминированный объект в системе управления, его позиционирование предлагается выполнять адаптивным нечетким регулятором с адаптивным фазификатором и дефазификатором.

Структурная схема адаптивного нечеткого контура управления дозатором приведена на рис. 2.24.

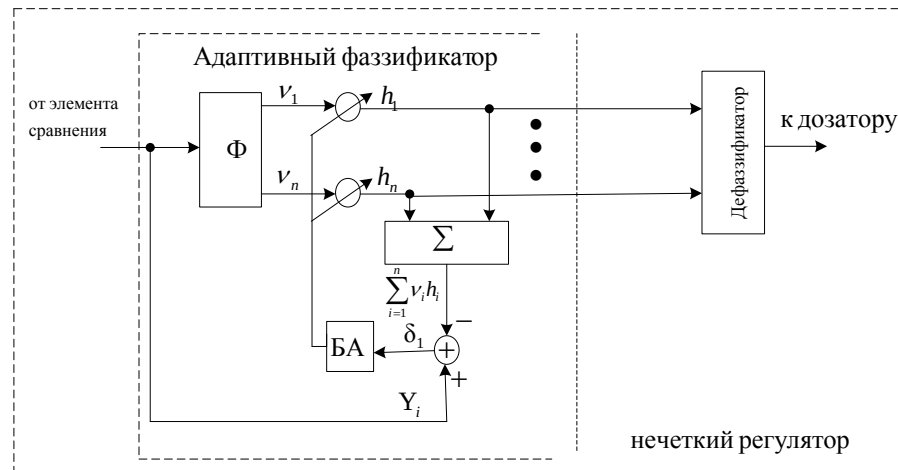


Рис. 2.24. Структурная схема контура управления дозатором: Φ – фазиффикатор, БА – блок адаптации, $v_1, \dots, v_n$ – степени принадлежности активированных функций принадлежности фаззификатора; $\sum_{i=1}^n v_i h_i$ – выходы сумматора адаптивного нейрона; $h_1, \dots, h_n$ – синапсы.

Регулятор управления расходом топлива в камеру сгорания на приемистости обеспечивает ограничение избытков топлива в двигатель при разгоне до нового установившегося режима и работает в режиме «постоянной заводки», при котором в зависимости от заданной программы ограничения непрерывно изменяется входной параметр регулятора – заданное значение положения дозирующего устройства $X_{\text{ди}}^{\text{зад}}$.

Параметры регулятора управления входным параметром ВРД – расходом топлива в камеру сгорания ВРД рассчитываются на частоту среза замкнутого контура управления положением дозатора 10 рад ($\omega_{\text{ср}} = 10$ рад/с), что обеспечивает разделение частот среза последовательно включенных контуров управления. Регуляторы выходных параметров ВРД (частота вращения, давление, температура и т.д.) рассчитаны на частоту среза 3 рад/с. Методом математического моделирования проведен сравнительный анализ работы классического регулятора управления расходом топлива в камеру сгорания и адаптивного нечеткого регулятора. Ступенчатое возмущение задавалось изменением заданного значения положения дозирующего устройства скачкообразным изменением заданного значения перемещения хода поршня дозирующего устройства

$$x_{\text{ди}}^{\text{зад}} = 4,33 \rightarrow 5,5 \text{ мм}.$$

На рис.2.25...рис.2.28 приведен сравнительный анализ осциллограмм изменения параметров ВРД в процессе приемистости, при компенсации действия ступенчатого возмущения классическим ПИД- регулятором управления расходом топлива (на рисунках график переходного процесса изображен линией с обозначением $*_i$) и адаптивным нечетким регулятором управления расходом топлива (на рисунках график переходного процесса изображен линией с обозначением $*b_j$).

В табл. 2.2 приведены условные обозначения параметров, приведенных на осциллограммах переходных процессов.

Таблица 2.2 - Обозначение параметров на графиках

Обозначение	Обозначение на рисунке	Параметр
$\alpha_{руд}$	$Lrud$	Положение (угол поворота) рычага управления двигателем, грд
n_{ε}	Nb	Частота вращения ротора вентилятора, об/м
G_T	Gt	Фактическое значение расхода топлива, кг/ч
$n_{\varepsilon\delta}$	Nbd	Частота вращения ротора КВД, об/м
$X_{\partial u}, X_{\partial u}^{зад}$	$aldi, ald z$	Фактическое, заданное положение дозатора, мм

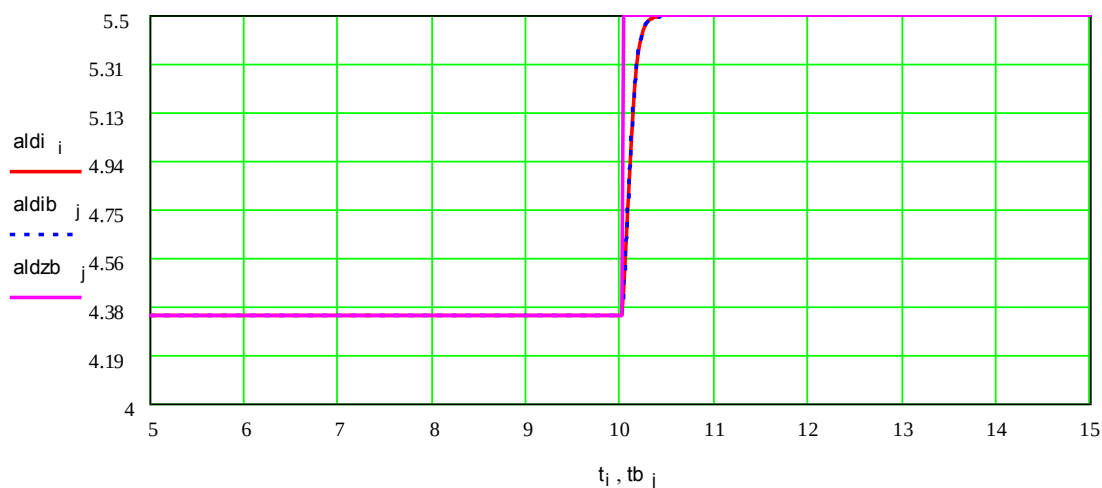


Рис.2.25. Осциллограммы изменения программного и фактического значения положения дозатора

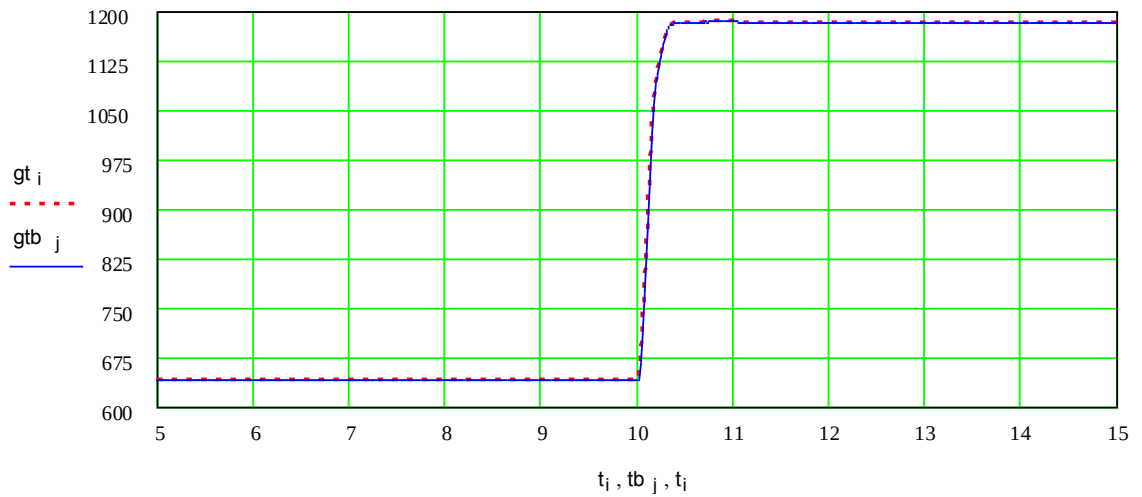


Рис.2.26. Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания

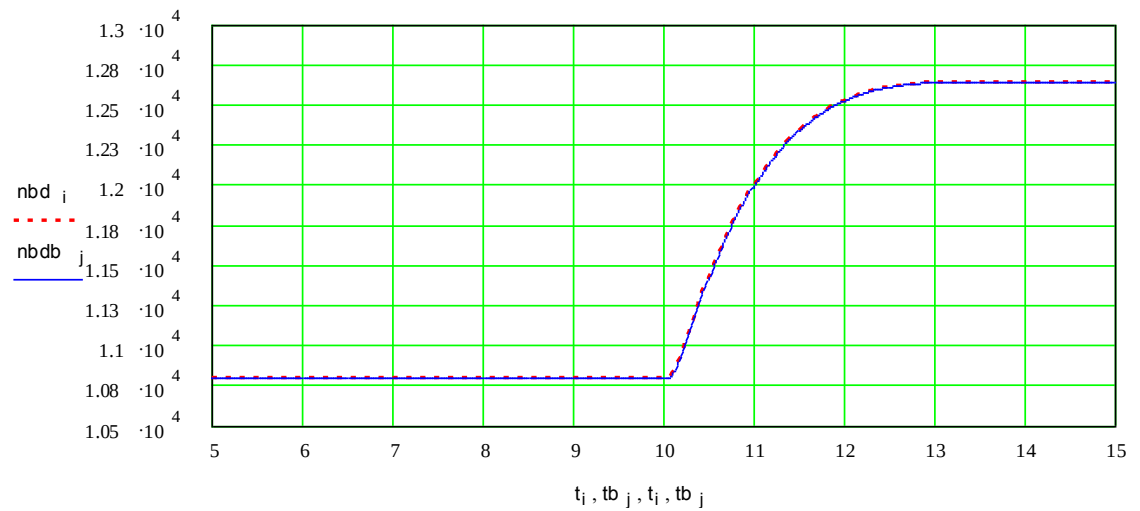


Рис. 2.27. Осциллограмма изменения частоты вращения ротора КВД

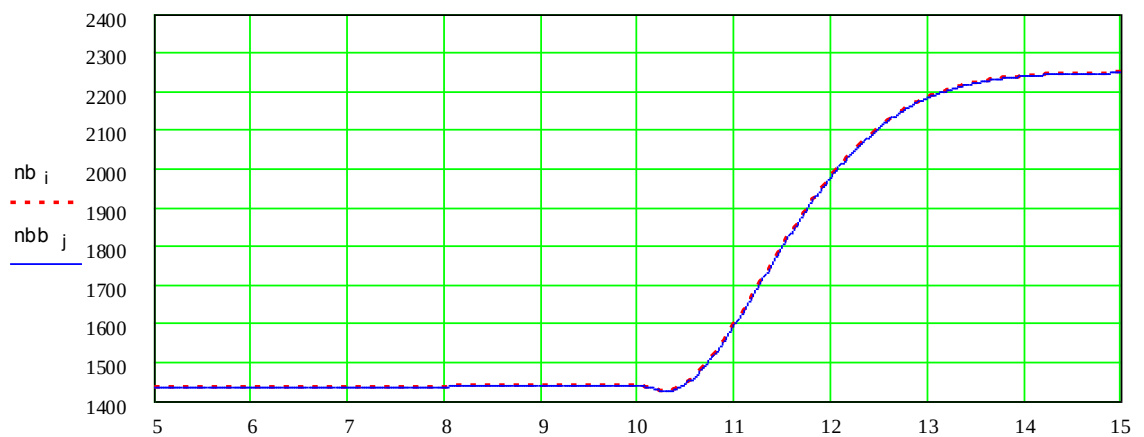


Рис.2.28. Осциллограмма изменения частоты вращения ротора НД

Все представленные графики переходных процессов, характеризующие изменения параметров двигателя $n_{ВД}$, $n_{В}$, G_T , $\alpha_{дн}$ при работе адаптивного нечет-

кого регулятора расхода топлива, аналогичны соответствующим графикам переходных процессов, полученным при работе классического ПИД- регулятора расхода топлива, и практически (с точностью до относительного отклонения $\varepsilon = 1\%$ в динамике) совпадают. При настроенных параметрах адаптивного нечеткого регулятора расхода топлива обеспечивается частота среза ≈ 10 рад/с, необходимая для обеспечения устойчивой совместной работы с регуляторами параметров двигателя, имеющими меньшую частоту среза.

Рассмотрено представление дозирующего устройства двумя передаточными функциями. В первой дозирующее устройство охвачено обратной связью по положению дозирующего крана (см. выше), во второй - не охвачено обратной связью.

Дозатор без обратной связи обладает астатическими свойствами. Для обеспечения устойчивости в замкнутом контуре управления параметров двигателя должен быть реализован статический адаптивный нечеткий регулятор с форсирующими характеристиками, корректирующими астатические свойства дозатора.

2.4.2 Анализ работы адаптивного нечеткого регулятора расхода топлива в замкнутой системе управления в условиях априорной определенности параметров объекта управления

На рис.2.29...рис. 2.33 приведены осциллограммы изменения параметров ВРД с корректным математическим описанием при его работе под управлением САУ с ПИД-регулятором и с адаптивным нечетким регулятором в процессе увеличения режима работы двигателя изменением положения РУД мгновенно с $\alpha_{руд} = 10^\circ \rightarrow 15^\circ$. В рассмотренном случае контур управления частотой вращения вентилятора воздействует на замкнутый контур управления дозирующим устройством (система каскадного регулирования). При данном исследовании использовалась исходная скоростная характеристика дозатора.

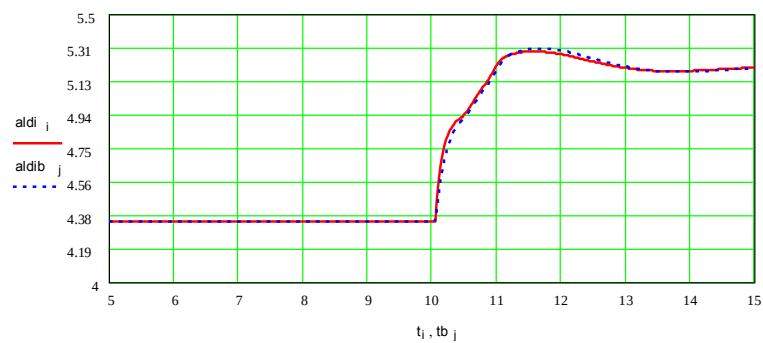


Рис.2.30. Осциллограммы изменения фактического значения положения дозатора

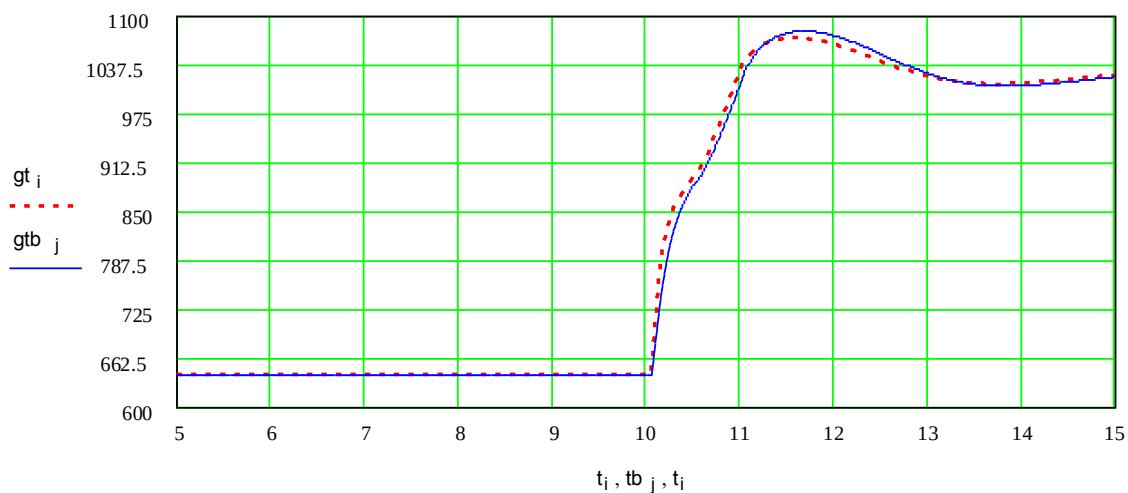


Рис.2.31. Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания

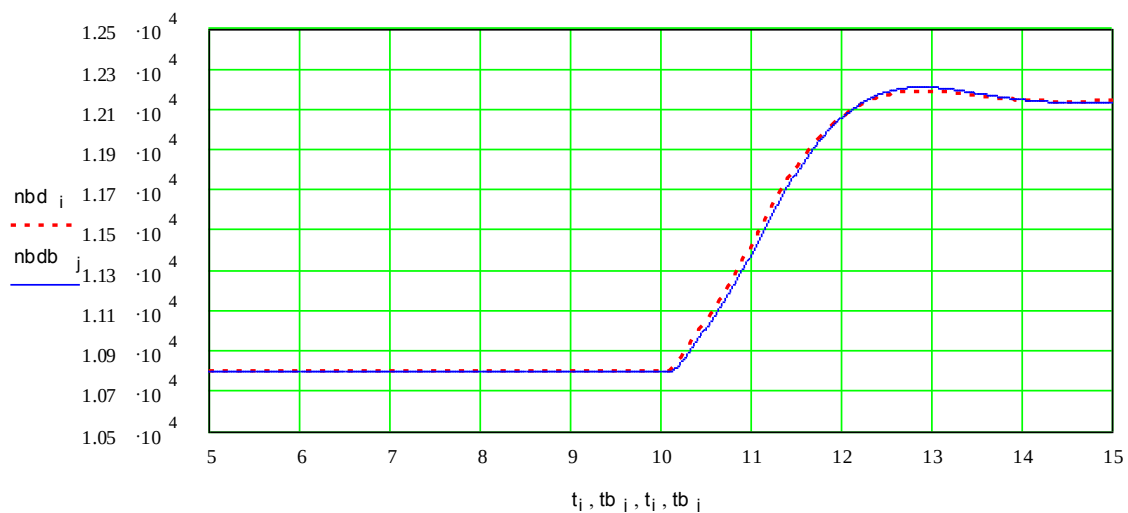


Рис.2.32. Осциллограмма изменения частоты вращения ротора КВД

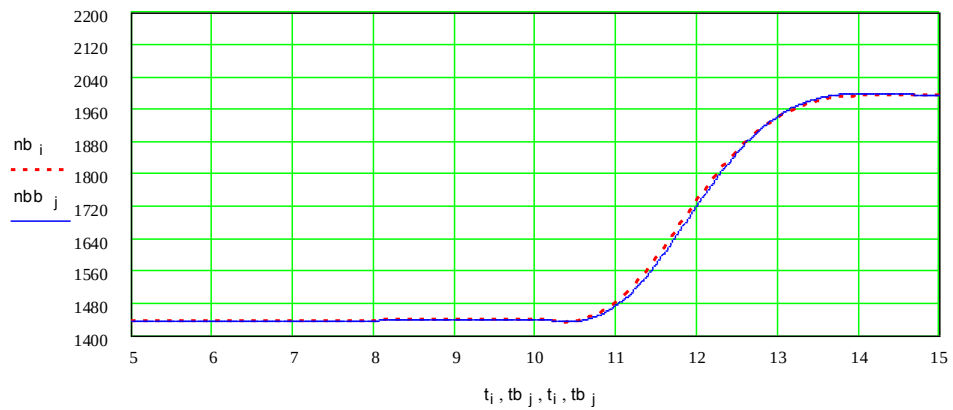


Рис. 2.33. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора вентилятора

Графики переходных процессов изменения параметров двигателя в условиях априорной определенности параметров объекта управления (полноты и корректности его математического описания) на рис.2.31...рис.2.33 имеют одинаковый вид. Данная проверка подтверждает тот факт, что адаптивный нечеткий регулятор расхода топлива в двигатель работает в замкнутой системе и обеспечивает заданное качество управления.

Однако, как показали проведенные в дальнейшем исследования по обеспечению гарантированного запаса устойчивости, в условиях действия параметрических возмущений, обусловленных некорректностью математического описания объекта управления, 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.

2.5 Инженерный метод проектирования адаптивных нечетких регуляторов

Поскольку, как было отмечено выше, синтез адаптивного нечеткого регулятора на основе адаптивного фаззификатора и дефаззификатора является довольно трудоемкой задачей, ниже предложен инженерный метод проектирования таких регуляторов, основанный на разработанном методе.

1. Задается цель проектирования.
2. Составляется структурная схема САУ.

3. Выбираются производственные правила. При затруднении формирования производственных правил определяется передаточная функция эталонной модели объекта регулирования по всем его параметрам.
4. Определяются лингвистические переменные входа и выхода и задается число терм по каждой переменной, устанавливаются пределы их изменения, обеспечивается нормирование всех переменных на интервале $[-1,1]$.
5. Задается характер функций принадлежности терм-множества фаззификатора по всем лингвистическим переменным.
6. Выбирается алгоритм адаптации фаззификатора.
7. Если лингвистических переменных больше двух, то выбираются правила нечеткой импликации и нечеткой композиции.
8. Выбирается метод дефаззификации.
9. Выбирается логический контроллер.
10. Проводится имитационное моделирование с целью оценки на работоспособность, устойчивость и качество управления.
11. Адаптивный нечеткий регулятор реализуется в аппаратуре.

Результаты исследования показали, что разработанный АНР на основе адаптивного фаззификатора обеспечивает заданное качество переходных процессов, которое существенно отличается в лучшую сторону от качества переходных процессов ПИД-регулятора в условиях изменения характеристик объекта управления в процессе работы.

Анализ полученных в результате исследования показателей качества разработанного АНР позволяет сделать вывод о наличии адаптивных свойств и возможности надежной работы при взаимодействии с другими контурами управления. АНР позволяет адаптироваться в реальном масштабе времени к изменениям в элементах системы управления, включая объект управления.

Недостатков разработанного АНР на основе адаптивного фаззификатора не выявлено.

АНР на основе адаптивного фаззификатора может быть рекомендован к применению в автоматических бортовых авиационных системах управления ВРД.

2.6 Выводы по второй главе

Рассмотрены две модели системы автоматического управления ВРД, на примере управления частотой вращения силовой турбины, обладающие адаптивными свойствами и работающие в условиях неполной информации об объекте управления или в условиях изменения характеристик объекта управления в процессе эксплуатации.

Первая модель построена на основе специализированной сети *Anfis*. Демонстрирует возможность адаптивного управления ВРД с использованием искусственной специализированной сети после обучения комбинированным методом.

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

Предложен метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов параметров ВРД на основе специализированной сети *Anfis*, в котором настройка (обучение) *Anfis* –сети выполняется комбинацией методов градиентного спуска в виде алгоритмов обратного распространения ошибки (ОРО) и метода наименьших квадратов (МНК).

Результаты исследования показали, что разработанный адаптивный нечеткий регулятор на базе сети *Anfis* обеспечивает заданное качество переходных

процессов, которое существенно отличается в лучшую сторону от качества переходных процессов ПИД-регулятора и адаптивного нечеткого регулятора без оптимизации параметров. Настроенный адаптивный нечеткий регулятор на базе сети *Anfis* уменьшил перерегулирование в переходном процессе при максимальном возмущающем воздействии в четыре раза по сравнению с ненастроенным регулятором и в два раза по сравнению с ПИД-регулятором. Время переходного процесса сократилось в три раза по сравнению с ПИД-регулятором.

Анализ полученных в результате исследования показателей качества разработанного адаптивного нечеткого регулятора управления частотой вращения силовой турбины ВРД на базе сети *Anfis* позволяет сделать вывод о наличии адаптивных свойств и возможности надежной работы при взаимодействии с другими контурами управления. Выявленным недостатком разработанного адаптивного нечеткого регулятора на базе сети *Anfis* является ограничение по выбору функций принадлежности, допускающих дифференцирование (функция Гаусса, сигмоидные функции) и длительное время обучения с учителем, 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.

Предложен метод синтеза адаптивных нечетких регуляторов параметров ВРД в качестве элемента системы управления для применения в бортовой авиационной аппаратуре, предназначенный для повышения качества управления в условиях неполного или некорректного математического описания характеристик объекта управления. Предложено применение адаптивного нечеткого регулятора, построенного на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации.

Рассмотрены методы адаптации фаззификатора. Выбран метод адаптации - метод последовательного обучения.

В предложенном методе синтеза адаптивных нечетких регуляторов, в котором, в отличие от известных методов, нечеткому регулятору придаются адаптивные свойства, учтены требования работы в режиме реального времени и требования реализуемости в бортовой авиационной аппаратуре, что характеризует новизну настоящей работы.

3. Метод проектирования систем автоматического управления с учетом обеспечения гарантированного запаса устойчивости систем управления двигателями

В замкнутой системе управления необходимы элементы, предназначенные для подавления помех в тракте управления, которые негативно влияют на процесс управления. Необходимы также элементы, называемые корректирующими звеньями, компенсирующие те или иные свойства объекта управления для придания замкнутой системе управления определенных желаемых качеств.

Параметры корректирующих звеньев по контурам выбираются таким образом, чтобы фильтрующие корректирующие звена по контурам компенсировало инерционность объекта управления при разных режимах работы. Это позволяет обычно сложную передаточную функцию замкнутой системы управления свести к простому виду и обеспечить желаемое поведение замкнутой системы управления.

При несоответствии математического описания реальному объекту, в реальной замкнутой системе, спроектированной по математическому описанию объекта управления, соответствующие инерционные характеристики объекта управления не будут скомпенсированы, и поведение замкнутой системы будет отличаться от желаемого.

В существующей практике корректирующие звенья имеют неизменяемые характеристики и не могут парировать изменение динамических свойств объекта управления. В этой связи актуально усовершенствование алгоритмов управления на основе количественной оценки инерционности объекта управления. Результат расчета инерционности объекта, как сигнал виртуального датчика, может быть заведен в систему управления.

Количественная оценка инерционности объекта управления придает корректирующим звеньям, в частности фильтрам, адаптивные свойства.

Предлагаемый метод учета инерционности объекта управления позволяет повысить качество управления ВРД за счет учета в системе управления измене-

ние инерционности объекта управления на разных режимах работы двигателя, что характеризует новизну в работе

Предлагаемый метод построения адаптивных фильтров, основан на применении теории чувствительности для количественной оценки текущей инерционности объектов управления (ВРД).

В САУ авиационных двигателей применяются все четыре основных класса фильтров: фильтры низких частот (ФНЧ), фильтры высоких частот (ФВЧ), полосовые фильтры (ПФ) и режекторные (заграждающие) фильтры (ЗФ).

Применительно к САУ рассматриваемого класса объектов, ФНЧ пропускают сигналы всех частот, находящихся ниже граничной частоты – частоты среза фильтра, определяемой на уровне $f_c = \text{минус } 3 \text{ дБ}$ [76, 79]. Такие фильтры используются для удаления гармонических составляющих сигналов или устранения помех от сигналов с высокой амплитудой на частотах выше частоты среза. За частоту среза принимается частота, при которой коэффициент передачи единичного сигнала равен $k = 0,7$.

ФВЧ пропускают сигналы всех частот, находящихся выше частоты среза. В системах управления такие фильтры используются для устранения помех от сигналов с высокой амплитудой ниже частоты среза [4а, 32а].

В САУ ВРД передаточная функция (ПФ) пропускают сигналы всех частот, находящихся в диапазоне между нижней f_{c1} и верхней f_{c2} граничными точками, определяемыми на уровне $f_{c1,2} = \text{минус } 3 \text{ дБ}$, и подавляют сигналы всех прочих частот, находящихся вне заданного диапазона. В САУ применяются как широкополосные (с малой добротностью), так и узкополосные (с большой добротностью) ПФ [4а, 32а].

ЗФ пропускают сигналы всех частот за исключением тех, что находятся в полосе заграждения между нижней f_{c1} и верхней f_{c2} граничными точками. В САУ применяются как широкополосные, так и узкополосные (фильтр-пробка) ЗФ. Фильтр-пробка используется для подавления сигналов единственной заданной частоты.

ЗФ в качестве элемента системы управления обеспечивает компенсацию форсирующих свойств объекта управления и заданные фильтрующие свойства замкнутой системы управления.

Разработанный метод определения характеристик режекторного адаптивного фильтра на основе исследования инерционности использован для объекта управления в контуре управления температурой газа ТРДД.

В данной главе теоретически обосновывается обеспечение гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления по амплитуде и фазе. Предложен метод расчета гарантированного запаса устойчивости при мягкой связи между амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиками или многозначности годографа регулируемого объекта.

3.1 Метод синтеза адаптивных фильтров на основе инерционности объекта управления

Метод синтеза адаптивных фильтров, основанный на использовании инерционности объекта управления, в частности ВРД, базируется на теории чувствительности [38].

Изменение тех или иных свойств системы автоматического управления, в частности, изменение ее запаса устойчивости, вызванное вариациями параметров объекта управления, называется чувствительностью системы. Количественная оценка изменения свойств системы, вызванных изменением свойств остальных элементов, может быть охарактеризована функцией чувствительности [38, 107].

Если какой-либо параметр системы управления a отклонился от расчетного значения a_0 на величину $\Delta a = a - a_0$, то выходные координаты $x(t)$ системы управления при прочих равных условиях получат дополнительное движение

$$\Delta x(t) = x(t) - x_0(t).$$

При разложении $x(t)$ в ряд Тейлора получается выражение:

$$x(t) = x_0(t) + \frac{dx(t)}{da} \Delta a + \frac{1}{2!} \frac{d^2 x(t)}{da^2} \Delta a^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n x(t)}{da^n} \Delta a^n$$

Так как значения членов ряда Тейлора для рассматриваемых объектов управления (ВРД), начиная со второго порядка, очень малы, ими можно пренебречь [4, 5]:

$$x(t) - x_0(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial a} \Delta a$$

или

$$\Delta x(t) = S_a(t) \Delta a,$$

где $S_a(t)$ – функция чувствительности первого порядка переменной $x(t)$ от малого изменения аргумента Δa .

Запись выражения в операторном виде:

$$\Delta x(p) = S_a(p) \Delta a, \text{ где}$$

$$S_a(p) = \frac{\partial x(p)}{\partial a}.$$

С учетом того, что $x(p) = U(p)\Phi(p)$, тогда отсюда можно выразить

$$S_a(p) = U(p) \frac{\partial \Phi(p)}{\partial a}.$$

Если рассматривать на входе системы импульсное воздействие, при котором алгебраическое выражение $U(p) = 1$, то

$$S_a(p) = \frac{\partial \Phi(p)}{\partial a}. \quad (3.1)$$

После взятия натурального логарифма от выражения (3.1), может быть получена относительная функция чувствительности:

$$S_\infty(p) = \frac{\partial \ln \Phi(p)}{\partial \ln a} = \frac{\partial \Phi(p)}{\partial a} \cdot \frac{a}{\Phi(p)} = S_a(p) \cdot \frac{a}{\Phi(p)}.$$

Заменяя в выражении (3.1) параметр a на передаточную функцию звена в САУ (общий случай) получим:

$$S(p) = \frac{\partial \Phi(p)}{\partial W(p)_\delta}.$$

Тогда изменение параметров САУ для малых приращений можно записать как:

$$\Delta \Phi(p) = S(p) \Delta W(p)_\delta.$$

Известно [91], что системы, сохраняющие при любых вариациях свойств элементов необходимый запас устойчивости, называются робастными.

Произведем оценку робастности САУ через $W(p)_{p.c.}$

$$\Delta |\Phi(j\omega)| = S_p(\omega) \cdot \Delta P(\omega) + S_Q(\omega) \cdot \Delta Q(\omega),$$

где

$$\Delta W(j\omega)_{p.c.} = \Delta P(\omega) + j\Delta Q(\omega).$$

$$S_p(\omega) = \frac{\partial |\Phi(j\omega)|}{\partial P(\omega)}; \quad S_Q(\omega) = \frac{\partial |\Phi(j\omega)|}{\partial Q(\omega)}.$$

Определим $S_p(\omega)$ и $S_Q(\omega)$:

$$\Phi(j\omega) = \frac{W(j\omega)_{p.c.}}{1 + W(j\omega)_{p.c.}};$$

$$|\Phi(j\omega)| = \left| \frac{P(\omega) + jQ(\omega)}{[1 + P(\omega)] + jQ(\omega)} \right| = \left[\frac{P^2 + Q^2}{(1 + P)^2 + Q^2} \right]^{0.5}.$$

$$\begin{aligned} S_p(\omega) &= \frac{\partial |\Phi(j\omega)|}{\partial P(\omega)} = 0,5 \left[\frac{P^2 + Q^2}{(1 + P)^2 + Q^2} \right]^{-0.5} \left(\frac{P^2 + Q^2}{(1 + P)^2 + Q^2} \right)' = \\ &= \frac{P^2 + P - Q^2}{[(1 + P)^2 + Q^2]^{1.5} (P^2 + Q^2)^{0.5}}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Аналогично, выполнив необходимые преобразования, получим:

$$S_Q(\omega) = \frac{Q(1 + 2P)}{[(1 + P)^2 + Q^2]^{1.5} (P^2 + Q^2)^{0.5}}. \quad (3.3)$$

В выражениях (3.2) и (3.3) Q и P есть мнимая и действительная составляющие комплексной функции чувствительности, соответственно.

Приведенная количественная оценка инерционности ТРДД с помощью теории чувствительности проведена впервые.

Предложенная количественная оценка инерционности позволяет [107]:

- определить степень влияния вариации каждого параметра регулируемого объекта на выходную величину;
- определить степень влияния параметров регулятора на выходную величину с целью организации их перенастройки.

Для обеспечения заданных требований по запасу устойчивости САУ ВРД при проектировании системы автоматического управления должна быть учтена инерционность по всем параметрам управления двигателем. А затем, с целью повышения расчетной устойчивости системы управления при вариации ее параметров, синтезируется адаптивный фильтр для коррекции инерционности объекта управления по предложенному методу.

Метод синтеза адаптивного фильтра:

1. Задается цель проектирования (определить параметры адаптивного фильтра с целью обеспечения заданных требований по запасу устойчивости САУ ВРД).
2. Составляется структурная схема системы управления с адаптивными фильтрами как ее элементами.
3. По передаточным функциям двигателя по каждому параметру определяется чувствительность двигателя как объекта управления.
4. Рассчитываются численные значения чувствительности по каждому параметру.
5. Определяются численные значения инерционности объекта управления по каждому параметру.
6. Вычисляются численные значения инерционности адаптивного фильтра регулятора исходя из желаемых значений инерционности замкнутой системы управления по каждому параметру.
7. Проводится имитационное моделирование с целью оценки влияния адаптивного фильтра на работоспособность, устойчивость и качество управления.
8. Реализуется адаптивный фильтр во встроенной системе управления, работающей в реальном времени.

3.2 Пример количественной оценки инерционности двигателя по температуре газа и синтез адаптивного фильтра по результатам этой оценки

В данном разделе, на основании предложенного метода, проведена количественная оценка инерционности ТРДД при изменении постоянной времени T_1 двигателя по параметру температуры газа:

Передаточная функция двигателя по параметру температуры газа имеет вид:

$$W(p) = \frac{K_{дв}^T (T_5 p + 1)}{T_1 p + 1}. \quad (3.4)$$

После замены $T_1 = q$, $K_{дв}^T = K$, выражение (3.4) будет иметь вид

$$W(p) = \frac{K (T_5 p + 1)}{q p + 1}.$$

Отсюда

$$S_q(p) = \frac{\partial \Phi(p)}{\partial q(p)} = - \frac{(K(T_5 p + 1))p}{(q p + 1)^2}.$$

Тогда абсолютная чувствительность выходного сигнала равна

$$S_q(t) = S_q(p) \cdot E(p), \text{ где } E(p) = \frac{1}{p}$$

$$S_q(t) = S_q(p) \cdot \frac{1}{p} = - \frac{(K(T_5 p + 1))p}{p(1 + qp)^2} = - \frac{(K(T_5 p + 1))p}{(q^2 p^2 + 2qp + 1)p} / q^2 p$$

$$= - \frac{\frac{K(T_5 p + 1)}{q^2}}{p^2 + \frac{2q}{p} + \frac{1}{q^2}}$$

$$S_q(t) = - \frac{\frac{K(T_5 p + 1)}{q^2}}{p^2 + \frac{2q}{p} + \frac{1}{q^2}} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) имеет корни p_k характеристического уравнения $F_2(p) = 0$ с кратностью $m_k = 2$ ($p_k = -\frac{1}{q}$).

Запишем формулу разложения для (3.5)

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{1}{(m_k-1)!} \left[\frac{d^{m_k-1}}{dp^{m_k-1}} \left(\frac{F_1(p)e^{pt}}{\frac{F_2(p)}{(p-p_k)^{m_k}}} \right) \right]_{p=p_k}.$$

Или

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{d}{dp} \left[\frac{K(T_5 p + 1)e^{pt}}{q^2} \cdot \frac{\left(p + \frac{1}{q}\right)^2}{\left(p + \frac{1}{q}\right)^2} \right]_{p=p_k} = -t \frac{K\left(1 - \frac{T_5}{q}\right)}{q^2} e^{pt}.$$

$$p = -\frac{1}{q}.$$

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} = -t \frac{K\left(1 - \frac{T_5}{q}\right)}{q^2} e^{-\frac{t}{q}}.$$

Заменяя q на T_1 , получим уравнение функции чувствительности

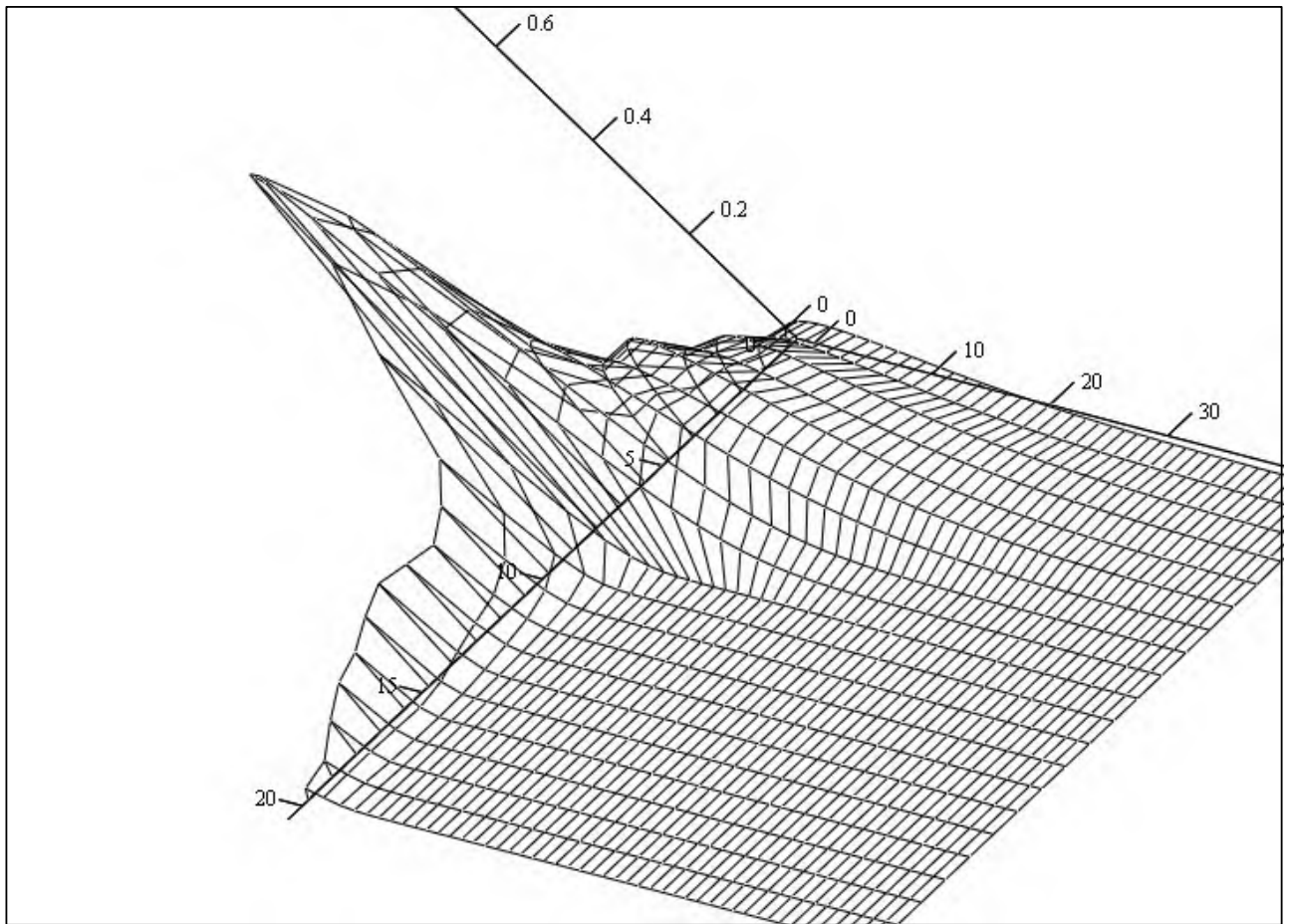
$$S_q(t) = -t \frac{K\left(1 - \frac{T_5}{T_1}\right)}{T_1^2} e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (3.6)$$

Исходные данные для расчета выражения (3.6) представлены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Исходные данные коэффициентов и постоянных времени объекта управления для расчета уравнения функции чувствительности

$K_{дв}^T$	T_1	T_5
2.65	3.18194	4.08258
1.43333	3.18337	5.10466
1.2	3.18423	6.76379
0.966667	3.18366	8.21826
0.760027	2.85363	10
0.766667	2.8589	9.98688
0.55	2.24438	10.5178
0.433333	1.46414	10.027
0.388182	1.24631	9.7646
0.14697	0.544558	2.87866
0.0818182	0.396367	1.73371
0.069697	0.337238	1.28839
0.058485	0.304068	1.11261
0.0575758	0.264582	0.985204
0.0515152	0.225006	0.945349
0.045303	0.192172	0.845689
0.0424242	0.182192	0.742157
0.0424242	0.19787	0.700807
0.0454545	0.236022	0.611094
0.0545455	0.33707	0.587023
0.0757576	0.393588	0.565427

Рассчитав все значения уравнения функции чувствительности представленные в табл. 3.1, построим $3d$ - график зависимости параметров $K_{дв}^T$, T_1 , T_5 от времени. На рис. 3.1 представлен $3d$ -график функции $S_q(t)$.



S_q

Рис. 3.1. График изменения функции $S_q(t)$ представлен в формате 3d где на оси 0-0.6 изображена величина функции $S_q(t)$, на оси 0-20 – номер N комбинации параметров $K_{дв}^T, T_1, T_5$ из таблицы 3.2, на оси 0-30 – время t

Также с помощью выражения (3.6) определим значение времени t_1 , при котором каждое значение $S_q(t)$ равно 0, или близкое к нулю. Значения функции $S_q(t)$ приведены табл. 3.2.

Таблица 3.2 Значения функции чувствительности $S_q(t)$

$K_{дв}^T$ T_1 T_5	t, c																
	0	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	6	8	10	14	16	18	20	22	24
$K_{дв}^T=2.65$ $T_1=3.1819$ $T_5=4.0825$	0	0,01712	0,03166	0,0439	0,05411	0,079	0,08658	0,08431	0,06745	0,04797	0,03198	0,01274	$7.764*10^{-3}$	$4.659*10^{-3}$	$2.761*10^{-3}$	$1.62*10^{-3}$	$9.425*10^{-4}$
$K_{дв}^T=1.4333$ $T_1=3.18337$ $T_5=5.10466$	0	0,01973	0,03648	0,051	0,06235	0,091	0,0998	0,09719	0,07778	0,05533	0,0369	0,0147	$8.966*10^{-3}$	$5.381*10^{-3}$	$3.19*10^{-3}$	$1.872*10^{-3}$	$1.872*10^{-3}$
$K_{дв}^T=1.2$ $T_1=3.1842$ $T_5=6.7637$	0	0,031	0,05686	0,07884	0,09719	0,14199	0,15558	0,15153	0,12129	0,08629	0,05756	0,02294	0,01399	$8.4*10^{-3}$	$4.98*10^{-3}$	$2.923*10^{-3}$	$1.702*10^{-3}$
$K_{дв}^T=0.9666$ $T_1=3.18366$ $T_5=8.21826$	0	0,03486	0,06445	0,08937	0,11	0,161	0,17634	0,17174	0,13745	0,09778	0,06521	0,02599	0,01585	$9.512*10^{-3}$	$5.639*10^{-3}$	$3.31*10^{-3}$	$1.926*10^{-3}$
$K_{дв}^T=0.7600$ $T_1=2.85363$ $T_5=10$	0	0,05353	0,098	0,13478	0,16464	0,23194	0,245	0,23	0,17129	0,11332	0,07	0,02422	0,01373	$7.666*10^{-3}$	$4.226*10^{-3}$	$2.307*10^{-3}$	$1.248*10^{-3}$
$K_{дв}^T=0.7666$ $T_1=2.8589$ $T_5=9.98688$	0	0,05357	0,09817	0,13493	0,16484	0,23237	0,24568	0,23089	0,172	0,11397	0,07	0,02446	0,01388	$7.76*10^{-3}$	$4.28364*10^{-3}$	$2.34*10^{-3}$	$1.26869*10^{-3}$
$K_{дв}^T=0.55$ $T_1=2.24438$ $T_5=10.5178$	0	0,09	0,162	0,21751	0,25944	0,33233	0,31927	0,27264	0,16775	0,09175	0,047	0,011	$5.19532*10^{-3}$	$2.3975*10^{-3}$	$1.09272*10^{-3}$	$4.93*10^{-4}$	$2.21*10^{-4}$
$K_{дв}^T=0.43333$ $T_1=1.46414$ $T_5=10.027$	0	0,21769	0,16925	0,09868	0,05115	$2.33574*10^{-3}$	$7.9998*10^{-5}$	$2.43546*10^{-6}$	$1.9*10^{-9}$	$1.32394*10^{-12}$	0	0	0	0	0	0	0
$K_{дв}^T=0.3881$ $T_1=1.24631$ $T_5=9.7646$	0	0,2681	0,17652	0,08717	0,03826	$8.98732*10^{-4}$	$1.58334*10^{-5}$	$2.47952*10^{-7}$	$5.13*10^{-11}$	$9.43654*10^{-15}$	0	0	0	0	0	0	0
$K_{дв}^T=0.14697$ $T_1=0.544558$ $T_5=2.87866$	0	0,28397	0,15464	0,06316	0,02293	$2.52*10^{-4}$	$2.078*10^{-6}$	$1.52289*10^{-8}$	$6.9*10^{-13}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$K_{дв}^T=0.081818$ $T_1=0.396367$ $T_5=1.73371$	0	0,249	0,12627	0,048	0,01624	$1.342*10^{-4}$	$8.32*10^{-7}$	$4.58534*10^{-9}$	$1.17497*10^{-13}$	0	0	0	0	0	0	0	0

$K_{\text{дв}}^T$ T_1 T_5	t, c																
	0	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	6	8	10	14	16	18	20	22	24
$K_{\text{дв}}^T=0.069697$ $T_1=0.337238$ $T_5=1.28839$	0	0,19463	0,11	0,04666	0,01758	$2.24555*10^{-4}$	$2.15*10^{-6}$	$1.831*10^{-8}$	$1.11958*10^{-12}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.058485$ $T_1=0.304068$ $T_5=1.11261$	0	0,24916	0,42	0,53124	0,59713	0,60323	0,457	0,3078	0,11779	0,04	0,01278	$1.16447*10^{-3}$	$3.39531*10^{-4}$	$9.74517*10^{-5}$	$2.76252*10^{-5}$	$7.75276*10^{-6}$	$2.15776*10^{-6}$
$K_{\text{дв}}^T=0.0575758$ $T_1=0.264582$ $T_5=0.985204$	0	0,34941	0,5718	0,70182	0,76568	0,68645	0,46157	0,27588	0,08315	0,02228	$5.59586*10^{-3}$	$5.59586*10^{-3}$	$7.26443*10^{-5}$	$1.6422*10^{-5}$	$3.66652*10^{-6}$	$8.1*10^{-7}$	$1.77656*10^{-7}$
$K_{\text{дв}}^T=0.0515152$ $T_1=0.225006$ $T_5=0.945349$	0	0,33557	0,424	0,40192	0,33861	0,11	0,02581	$5.48538*10^{-3}$	$2.09*10^{-4}$	$7.08218*10^{-6}$	$2.24927*10^{-7}$	$2.03283*10^{-10}$	$2.03283*10^{-10}$	$1.68723*10^{-13}$	$1.68723*10^{-13}$	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.045303$ $T_1=0.192172$ $T_5=0.845689$	0	0,23379	0,24884	0,19865	0,141	0,02262	$2.72181*10^{-3}$	$2.91145*10^{-4}$	$2.811*10^{-6}$	$2.412*10^{-8}$	$1.94*10^{-10}$	$1.12538*10^{-14}$	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.0424242$ $T_1=0.182192$ $T_5=0.742157$	0	0,2	0,19621	0,14	0,0891	$9.18519*10^{-3}$	$7.1*10^{-4}$	$4.88115*10^{-5}$	$1.94543*10^{-7}$	$6.89222*10^{-10}$	$2.28914*10^{-12}$	0	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.0424242$ $T_1=0.19787$ $T_5=0.700807$	0	0,1848	0,16243	0,11	0,06274	$4.68*10^{-3}$	$2.61887*10^{-4}$	$1.3*10^{-5}$	$2.71833*10^{-8}$	$5.04288*10^{-11}$	$8.77*10^{-14}$	0	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.0454545$ $T_1=0.0236022$ $T_5=0.611094$	0	0,01275	$6.4*10^{-7}$	$2.41178*10^{-11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.054545$ $T_1=0.33707$ $T_5=0.587023$	0	0,04239	0,04	0,02885	0,01832	$1.88628*10^{-3}$	$1.45632*10^{-4}$	$9.9944*10^{-6}$	$3.97162*10^{-8}$	$1.4*10^{-10}$	$4.64576*10^{-13}$	0	0	0	0	0	0
$K_{\text{дв}}^T=0.075757$ $T_1=0.393588$ $T_5=0.565427$	0	0,02828	0,02997	0,02382	0,01683	$2.65219*10^{-3}$	$3.13524*10^{-4}$	$3.29447*10^{-5}$	$3.06923*10^{-7}$	$2.54167*10^{-9}$	$1.97325*10^{-11}$	$1.06565*10^{-15}$	0	0	0	0	0

Проанализировав значения табл. 3.2 можно сделать вывод, что при величине $t_1 = 24$ с значение функции $S_q(t) = 0$ или близкое к 0. За время 24с переходный процесс в объекте управления, вызванный единичным ступенчатым возмущением затухает.

Площадь фигуры S , ограниченной функцией $S_q(t)$ и осью абсцисс, дает количественную оценку инерционности САУ.

$$S = - \int_0^{t_1} t \frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})}{T_1^2} e^{-\frac{t}{T_1}} dt + C . \quad (3.7)$$

Интеграл в (3.7) возьмем по частям, а именно в выражении:

$$\int V dU = UV - \int U dV,$$

обозначим

$$V = t;$$

тогда $dV = dt$; а $dU = \frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})}{T_1^2} e^{-\frac{t}{T_1}}$ и $U = -\frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}.$

С учетом принятых обозначений выражение (3.5а) примет вид:

$$\begin{aligned} S &= - \int_0^{t_1} t \frac{k}{T^2} e^{-\frac{1}{T}t} dt + C = -(-\frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \int_0^{t_1} \frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} dt) + C = \\ &= \frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})(T_1 e^{-\frac{t_1}{T_1}} - T_1 - t e^{-\frac{t_1}{T_1}})}{T_1} + C. \end{aligned}$$

При условии равенства нулю постоянной интегрирования ($C = 0$), выражение (численное значение инерционности) имеет вид:

$$S = \frac{K(1-\frac{T_5}{T_1})(T_1 e^{-\frac{t_1}{T_1}} - T_1 - t e^{-\frac{t_1}{T_1}})}{T_1} . \quad (3.6)$$

Подставив в выражение (3.6) значения исходных данных из табл. 3.1 получаем численное значение инерционности параметра температуры газа для каждого значения частоты вращения при изменении постоянной времени T_1 .

Рассчитанные значения инерционности S представлены в табл. 3.3, где N – номер комбинации параметров $K_{дв}^T, T_1, T_5$.

На рис. 3.2 представлен график изменения численного значения инерционности S в зависимости от номер N комбинации параметров $K_{дв}^T, T_1, T_5$.

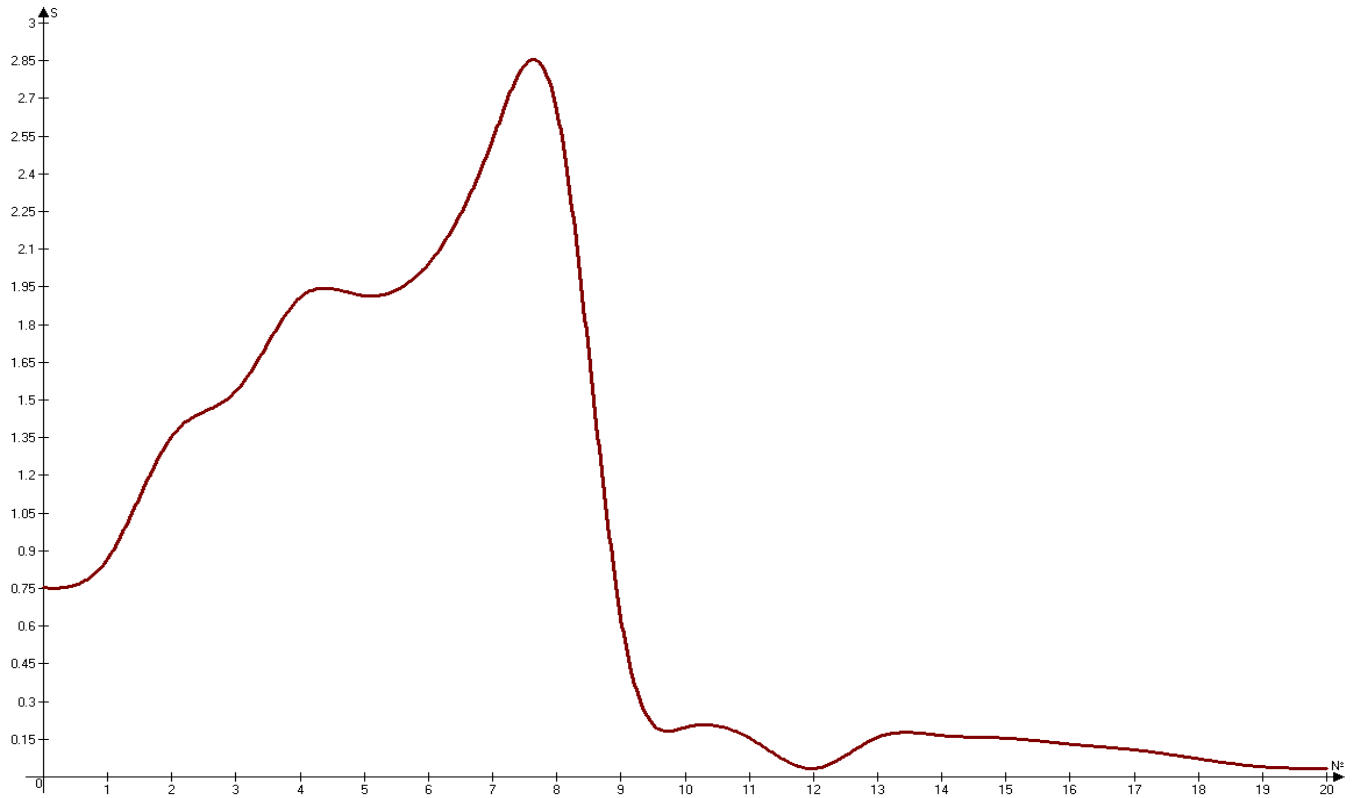


Рис.3.2. График изменения численного значения инерционности S объекта управления в зависимости от номера N комбинации параметров

Таблица 3.3 – Численные значения S инерционности по параметру температуры газов при изменении постоянной времени T_1 , при $t_l = 24$ с

N	$K_{дв}^T$	T_1	T_5	S
0	2.65	3.18194	4.08258	0.75276
1	1.43333	3.18337	5.10466	0.86808
2	1.2	3.18423	6.76379	1.354
3	0.966667	3.18366	8.21826	1.53399
4	0.760027	2.85363	10	1.90648
5	0.766667	2.8589	9.98688	1.91469
6	0.55	2.24438	10.5178	2.04094
7	0.433333	1.46414	10.027	2.5343
8	0.388182	1.24631	9.7646	2.65315
9	0.14697	0.544558	2.87866	0.62995
10	0.0818182	0.396367	1.73371	0.19657
11	0.069697	0.337238	1.28839	0.15552
12	0.058485	0.304068	1.11261	0.03308
13	0.0575758	0.264582	0.985204	0.15681
14	0.0515152	0.225006	0.945349	0.16492
15	0.045303	0.192172	0.845689	0.15406
16	0.0424242	0.182192	0.742157	0.13039
17	0.0424242	0.19787	0.700807	0.10783
18	0.0454545	0.236022	0.611094	0.072
19	0.0545455	0.33707	0.587023	0.04045
20	0.0757576	0.393588	0.565427	0.03308

Анализ данных табл. 3.3 показал, что инерционность ТРДД по параметру температуры газа при изменении постоянной времени T_1 изменяется в пределах от 0,033 до 2,653. Такое изменение инерционности (фильтрующих свойств) объекта управления требует коррекции в элементах системы управления.

Далее приведен пример коррекции инерционности объекта управления, которая реализуется в корректирующих звеньях системы управления.

Коррекция инерционности объекта управления, реализуемая в корректирующих звеньях системы управления необходима для того, чтобы функционирование замкнутой системы управления не зависело от изменения характеристик объекта управления. Как правило, желаемое значение инерционности замкнутой системы управления выбирается постоянным. Например, желаемое

значение инерционности замкнутого контура управления по параметру температуры газа принято равным $s = 0,3$ [59].

На рис. 3.3. приведена характеристика инерционности регулятора температуры, полученная суммированием желаемой характеристики инерционности замкнутого контура управления и характеристики инерционности ВРД .

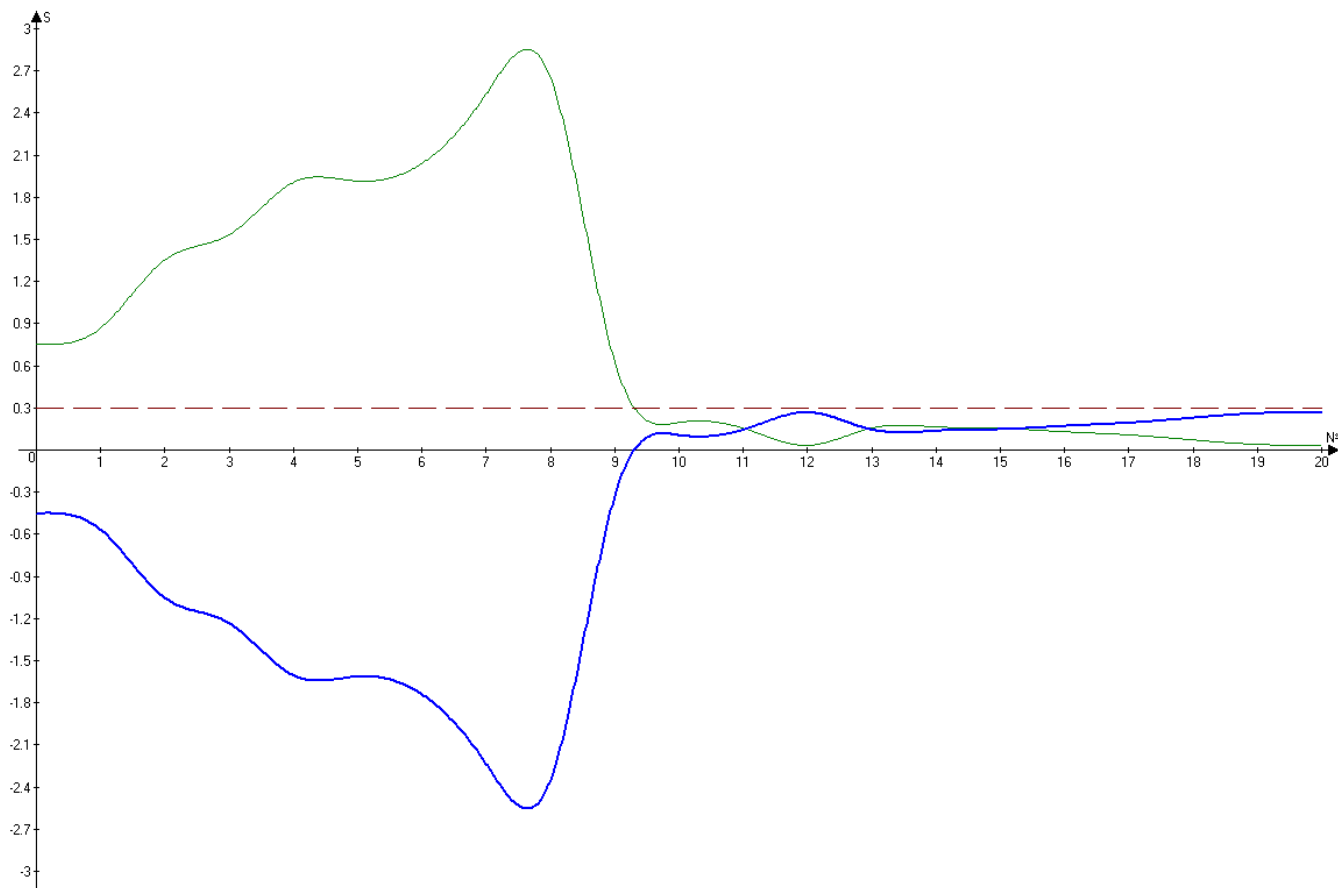


Рис. 3.3. Характеристика инерционности регулятора,

где S – численное значение инерционности объекта управления, N – номер комбинации параметров, полужирная сплошная синяя линия – инерционность регулятора, тонкая сплошная зеленая линия – инерционность двигателя, пунктирная красная линия – желаемая инерционность

Аналогично, в соответствии с предложенным методом, рассчитывается инерционность двигателя по температуре по параметрам $K_{\partial\theta}^T$ и T_5 и по другим регулируемым параметрам двигателя.

Полученная информация об инерционности двигателя позволяет более точно изменять параметры фильтров. Предложено реализовать расчет инерционности объекта управления в системе управления в виде «виртуального датчи-

ка 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 объекта управления, обеспечивает практическую устойчивость по фазе замкнутой системы управления при любых изменениях параметров объекта управления.

На основании вышеизложенного, передаточная функция корректирующего звена адаптивного фильтра приведена в (3.8):

$$W(j\omega) = C_1 (f(T_\Sigma) p + 1), \quad (3.8)$$

где $f(T_\Sigma)$ – функция изменения суммарной инерционности объекта управления.

В результате, в замкнутую систему управления введены элементы, называемые корректирующими звеньями, компенсирующие те или иные свойства объекта управления для придания замкнутой системе управления определенных желаемых качеств и в том числе предназначенные для подавления помех в тракте управления.

Предлагаемый метод учета инерционности объекта управления повышает качество управления ВРД за счет учета изменения инерционности объекта управления на разных режимах работы двигателя. Количественная оценка инерционности объекта управления придает корректирующим звеньям, в частности фильтрам, адаптивные свойства.

3.3 Совместная работа адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров в контурах управления параметрами ВРД

В рамках данного исследования разработаны адаптивные нечеткие регуляторы управления параметрами ВРД, содержащие адаптивные фильтры:

– адаптивный нечеткий регулятор частоты вращения ротора вентилятора ТРДД;

- адаптивный нечеткий регулятор частоты вращения ротора КВД (газогенератора);
- адаптивный нечеткий ограничитель частоты вращения ротора КВД;
- адаптивный нечеткий ограничитель давления воздуха за КВД;
- адаптивный нечеткий ограничитель температуры газов за турбиной;
- адаптивный нечеткий регулятор ускорения ротора КВД на приемистости;
- адаптивный нечеткий регулятор ускорения ротора КВД на сбросе режима работы двигателя;
- адаптивный нечеткий ограничитель расхода топлива в КС на приемистости;
- адаптивный нечеткий ограничитель расхода топлива в КС на сбросе режима работы двигателя.

Замкнутая система управления спроектирована таким образом, что сигналы об ошибках регулирования всех выше названных контуров управления сравниваются между собой и выбираются по заданному алгоритму селекции (выбора) минимальной и/или максимальной ошибки регулирования. Выбранный результат сравнения обеспечивает перемещение дозирующего устройства на заданную величину. Селекция между всеми статическими и динамическими нечеткими контурами управления двигателем осуществляется по сформированным в контурах управления сигналам об ошибках регулирования $K_c \cdot \sum \phi_i u_i$, по минимуму или максимуму, согласно заданной последовательности селекции [79]. В управляющем сигнале $K_c \cdot \sum \phi_i u_i$ – составляющие K_c – согласующий коэффициент, а $\sum \phi_i u_i$ – сигнал с выхода дефаззификатора.

Моделирование и экспериментальные данные, полученные с использованием разработанных алгоритмов и программ, подтвердили возможность совместной работы всех адаптивных нечетких регуляторов, адаптивных фильтров и обеспечили в сравнении с работой классических регуляторов совпадение результатов работы с заданной точностью в условиях полного и корректного математического описания объекта управления.

Графики переходных процессов при совместной работе всех контуров управления двигателем на установившихся режимах работы двигателя на малом газе, на максимальном режиме и на переходном режиме приемистости представлены на рис. 3.4...рис. 3.8. Изменение режима работы двигателя с малого газа до взлетного режима задавалось изменением положения рычага управления двигателем РУД от площадки малого газа до площадки взлетного режима за время 0,5 с.

Графики переходных процессов, наблюдаемых при работе системы автоматического управления с адаптивными нечеткими регуляторами на рис. 3.4...рис. 3.7 изображены линиями с обозначением $*b_j$, с классическими регуляторами – линиями с обозначением $*i$.

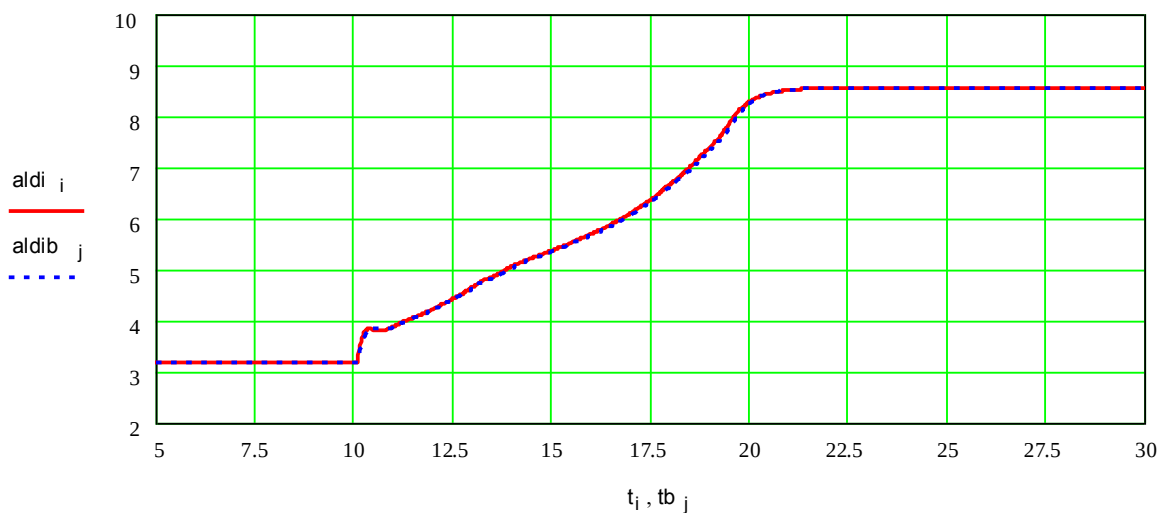


Рис. 3.4. Осциллограммы изменения фактического значения положения дозатора

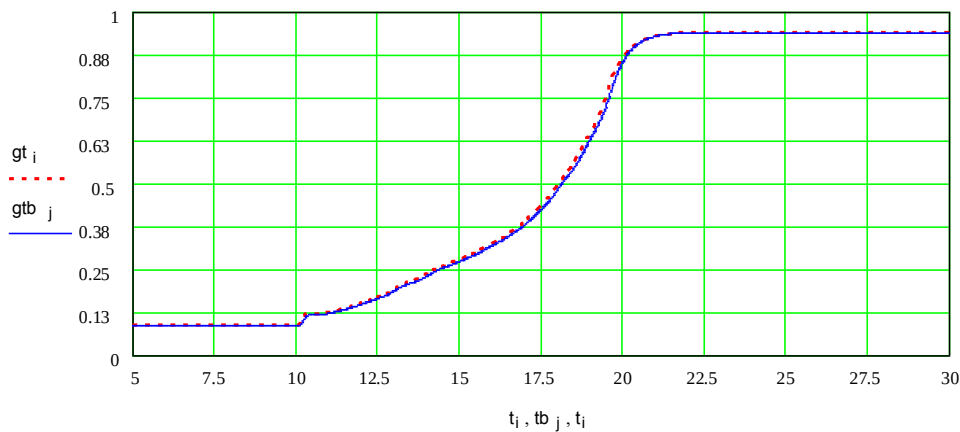


Рис. 3.5. Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания

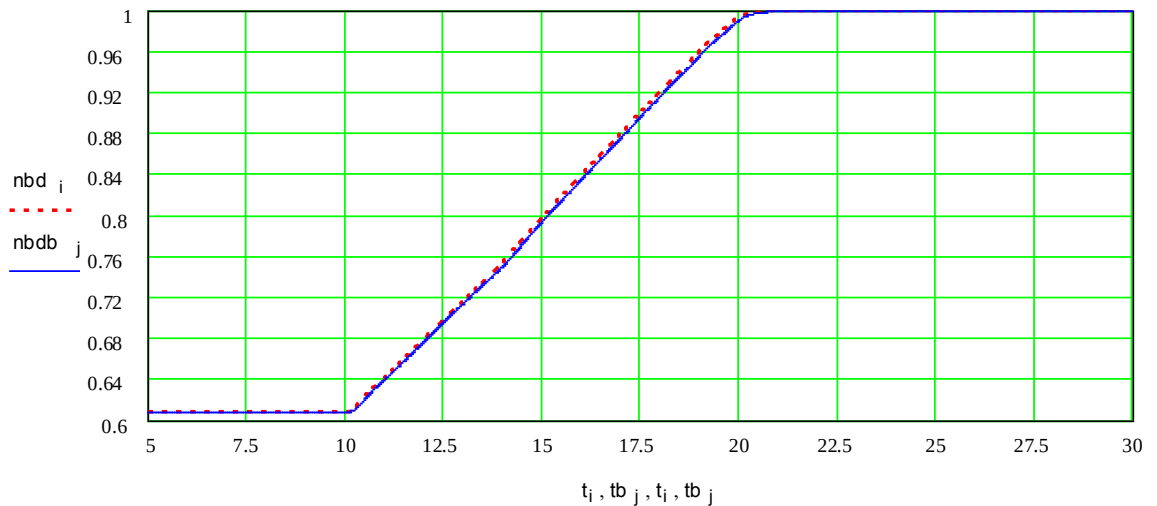


Рис. 3.6. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора КВД

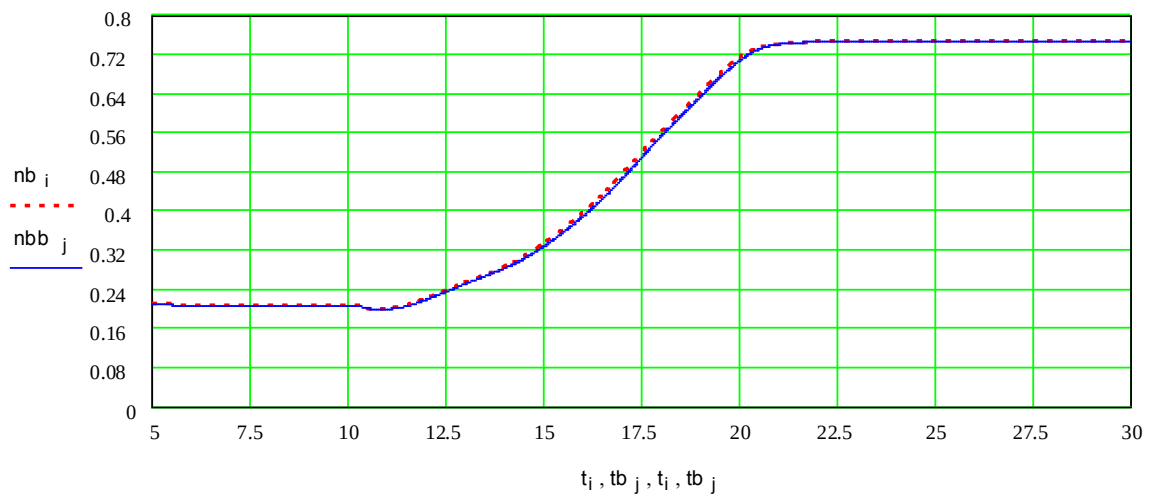


Рис. 3.7. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора низкого давления

Аналогичные переходные процессы наблюдаются в системе при совместной работе всех контуров управления двигателем при сбросе режима работы двигателя.

Как показал эксперимент, совместная работа всех адаптивных нечетких регуляторов, адаптивных фильтров в замкнутой системе управления в сравнении с работой классических регуляторов в условиях полного и корректного математического описания объекта управления устойчива, характер переходных процессов апериодический, как того требуют авиационные правила [3а], качество управления соответствует требованиям, точность не хуже 0,15%.

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

3.4 Разработка метода обеспечения гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления

Для повышения расчетной устойчивости системы управления предложен новый метод обеспечения гарантированного запаса устойчивости по модулю и фазе.

Предложенный метод на базе частотного показателя колебательности M обеспечивает гарантированный запас устойчивости замкнутой системы управления и базируется на основе одного из критериев устойчивости - частотном показателе колебательности M [46, 107].

Являясь модификацией критерия Найквиста, данный критерий исходит из принадлежности «опасной» точки с координатами $(-1, j0)$ к особой (запретной) области комплексной плоскости. Учитывая неточность в математическом описании объекта управления, модифицированный критерий Найквиста расширяет границу устойчивости от точки до некоторой области комплексной плоскости. Критический с позиций устойчивости характер этой области связан с запретом вхождения в нее годографа разомкнутой нелинейной системы управления, содержащей объект управления, характеризующийся возможным изменением характеристик в процессе функционирования.

Учитывая неточность в математическом описании объекта управления, обусловленную неопределенностью и переменностью его характеристик, в дальнейшем принимаем, что, например, ВРД по температуре газа имеет относительную передаточную функцию, полученную ранее:

$$W(p)_{де} = \frac{K_{де} (T_5 p + 1)}{(T_{де} p + 1)}, \quad (3.9)$$

где $K_{де}$ — коэффициент усиления изменения температуры газа за турбиной низкого давления; T_5 — постоянная времени; $T_{де}$ — постоянная времени температуры газа.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью $A(\omega)_{\text{зс}}$ определяется как модуль её частотной передаточной функции $\Phi(j\omega)$:

$$A(\omega)_{\text{зс}} = |\Phi(j\omega)| = \frac{|W(j\omega)_{\text{pc}}|}{|1 + W(j\omega)_{\text{pc}}|} = \frac{OA}{BA}, \text{ где}$$

$$W(j\omega)_{\text{pc}} = \frac{C_1 j\omega + C_0}{j\omega} \cdot \frac{K_{\text{ou}}}{T_{\text{ou}} j\omega + 1} W(j\omega)_{\text{os}}$$

Отрезки ОА и ВА показаны на рисунке 3.10.

Введем понятие частотного показателя колебательности M

$$M = \frac{A(\omega_p)}{A(0)}, \quad (3.10)$$

где $A(\omega_p)$ – АЧХ замкнутой системы управления на резонансной частоте. Под резонансной частотой понимается частота, при которой амплитуда колебаний замкнутой системы максимальна. $A(0)$ – АЧХ замкнутой системы управления при нулевой частоте.

Графическая интерпретация частотного показателя колебательности M представлена на рис. 3.8.

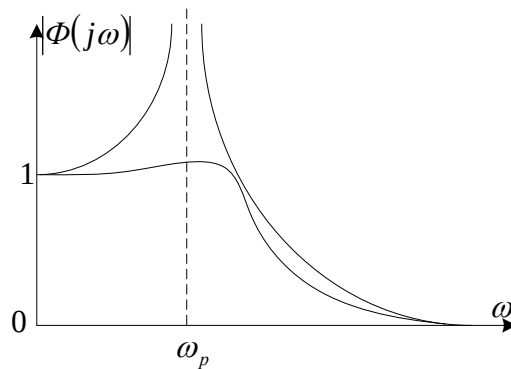


Рис. 3.8. Графическая интерпретация частотного показателя колебательности M

Запас устойчивости замкнутой САУ определяется степенью удаления годографа $W(j\omega)_{\text{pc}}$ от «опасной» точки с координатами $(-1, j0)$ и количественно равен величине обратной $|\Phi(j\omega)|_{\text{max}}$. Чем больше $|\Phi(j\omega)|_{\text{max}}$, тем больше годо-

граф $W(j\omega)_{pc}$ приближается к «опасной» точке, и тем меньше запас устойчивости САУ.

Определим геометрическое место точек годографа разомкнутой системы на комплексной плоскости при условии $M = \frac{0A}{BA} = const$, как показано на рис.3.9.

Для этого выразим отрезки $0A$ и BA через координаты комплексной плоскости

$$0A = \sqrt{Re^2 + Im^2}; \quad BA = \sqrt{(1 - Re)^2 + Im^2}. \quad (3.11)$$

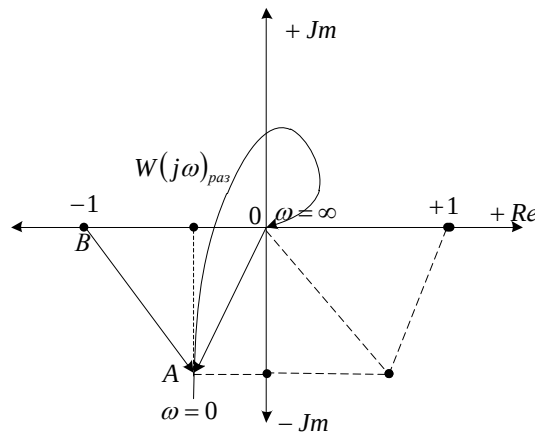


Рис. 3.9. К определению графических мест точек при постоянном значении частотного показателя колебательности M

В соответствии с выражениями (3.10) и (3.11) произведем следующие преобразования:

$$(Re^2 + Im^2) / ((1 - Re)^2 + Im^2) = M^2 \text{ или } Re^2 + Im^2 = (1 - 2Re + Re^2 + Im^2)M^2,$$

$$Re^2 + Im^2 - M^2 + 2ReM^2 - Im^2M^2 - Re^2M^2 = 0,$$

$$\text{тогда } (Re^2 + Im^2) + 2ReM^2 - M^2 - M^2(Re^2 + Im^2) = 0$$

$$(Re^2 + Im^2)(1 - M^2) + 2ReM^2 - M^2 = 0$$

и, разделив правую и левую часть уравнения на $(1 - M^2)$, получим

$$Re^2 + 2ReM^2/(1 - M^2) - M^2/(1 - M^2) + Im^2 = 0, \text{ или}$$

$$Re^2 - 2ReM^2/(M^2 - 1) + M^2/(M^2 - 1) + Im^2 = 0,$$

выделим в левой части полный квадрат, применив искусственный прием

$$Re^2 - 2ReM^2/(M^2 - 1) + (M^2/(M^2 - 1))^2 - (M^2/(M^2 - 1))^2 + M^2/(M^2 - 1) + Im^2 = 0,$$

После группировки слагаемых получим

$$Re^2 - 2 \frac{Re \cdot M^2}{M^2 - 1} + \left(\frac{M^2}{M^2 - 1} \right)^2 + Im^2 - \left(\frac{M}{M^2 - 1} \right)^2 = 0$$

Сведем полученное выражение к известной формуле окружности вида

$$(Re - R)^2 + Im^2 = r^2,$$

где $R = \frac{M^2}{M^2 - 1}$ – расстояние удаления центра окружности от начала координат;

$r = \frac{M}{M^2 - 1}$ – радиус окружности «опасной» области.

Запишем ограничения

$$R = r M; \quad 1 \leq M \leq \infty.$$

$$U_1 = |R| - r = \frac{M}{M + 1}.$$

При $M = 1$; $U_1 = 0,5$; $U_2 = \infty$ и окружность вырождается в прямую линию.

$$U_2 = |R| + r = \frac{M}{M - 1}.$$

При условии $M = \infty$ следует, что $r = 0$; $R = 1$ и окружность вырождается в точку с координатами $-1, j0$.

Требование, чтобы максимум $|\Phi(j\omega)|$ не превышал заданного значения, сводится к выполнению условия, что годограф $W(j\omega)_{pc}$ не должен заходить внутрь «опасной» области, ограниченной окружностью с заданным индексом, где $M_{\text{зад}} = 1,1-1,6$.

Определим предельно гарантированный запас устойчивости по модулю при $M = \text{const}$.

$$C = 1 - (R - r) = 1 - \frac{M^2}{M^2 - 1} + \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{M - 1}{M^2 - 1} = \frac{1}{M + 1}. \quad (3.12)$$

C – отрезок между точкой с координатами $-1, j0$ и точкой пересечения отрицательной действительной оси с годографом $W(j\omega)_{pc}$. Численное значение отрезка C показывает величину изменения АЧХ разомкнутой системы $|W(j\omega)_{pc}|$ при постоянном фазовом соотношении, необходимую для того, чтобы система управления вышла на границу устойчивости, показанную на рис.3.10.

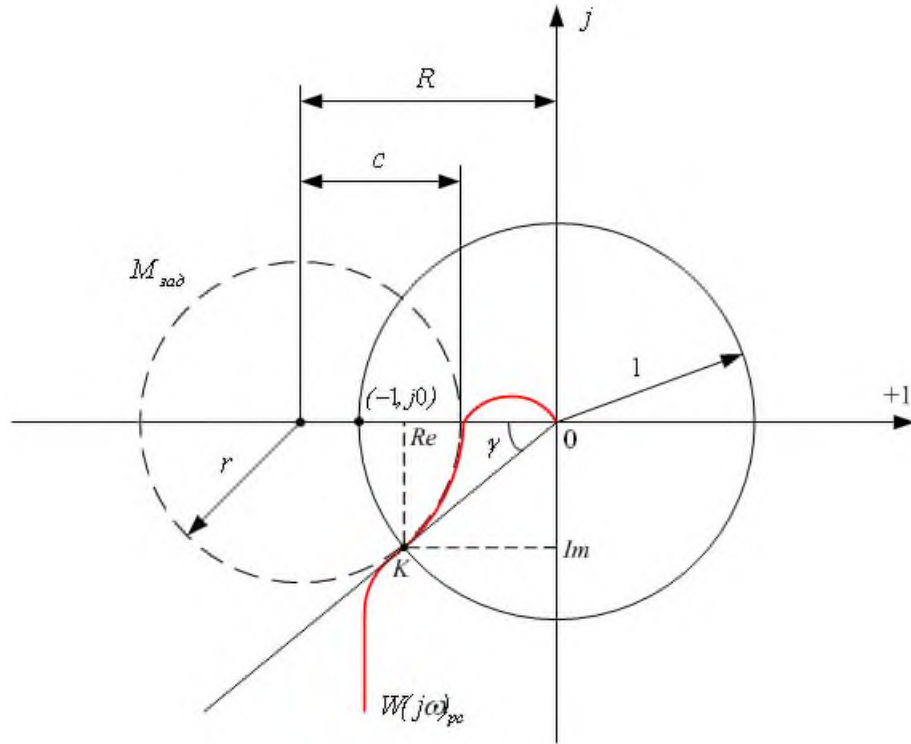


Рис. 3.10. К расчету предельных значений запаса устойчивости по модулю и фазе

Определим запас по фазе γ при условии $M = const$.

Под запасом устойчивости по фазе понимают предельный угол γ , лежащий между вещественной отрицательной осью и лучом, проведенным из начала координат через точку пересечения годографа $w(j\omega)_{pc}$ с единичной окружностью, с центром, лежащим в начале координат.

Для определения координаты точки пересечения единичной окружности с годографом разомкнутой системы, запишем систему уравнений:

$$Re^2 + Im^2 - \frac{2M^2}{M^2 - 1} Re + \frac{M}{M^2 - 1} = 0 ;$$

$$Re^2 + Im^2 = 1 .$$

Из решения системы уравнений находим искомую координату

$$Re = 1 - \frac{1}{2M^2} ,$$

где из треугольника $\triangle Re OK$ (см. рис. 3.10) следует

$$\gamma_{пред} = \arccos \left(1 - \frac{1}{2M^2} \right) .$$

Численное значение частотного показателя M показывает на сколько допустимо отставание по фазе при условии $M = const$, чтобы система управления оказалась на границе устойчивости.

3.5 Пример синтеза настроек регулятора с гарантированной устойчивостью на основе предложенного метода

Согласно критерию Найквиста [5] условие нахождения разомкнутой САУ на границе устойчивости имеет вид:

по модулю:

$$\operatorname{mod} W(j\omega)_{pc} = -C_{\text{пред}}, \quad (3.13)$$

по фазе

$$\arg W(j\omega)_{pc} = \gamma_{\text{пред}} \quad (3.14)$$

где $C_{\text{пред}}$ – предельно гарантированный запас устойчивости САУ по модулю;

$\gamma_{\text{пред}}$ – предельно гарантированный запас устойчивости САУ по фазе.

Левая часть уравнения (3.13) задается массивом чисел, отражающих переменность параметров передаточной функции (3.9), где учтен коэффициент усиления двигателя, коэффициент усиления дозатора и коэффициент усиления пропорциональной части (C_1) ПИ-регулятора. Астатизм системы регулирования достигается интегральной составляющей ПИ-регулятора, включенного в схему управления дозатором, охваченным обратной связью.

Из (3.13) следует

$$C_1 = \frac{C}{K_{\partial v} \cdot K_{\partial u}}. \quad (3.15)$$

В рассмотренном примере для регулятора температуры газа постоянные времени передаточной функции находятся по формуле

$$\arg W(j\omega)_{pc} = \operatorname{arctg} \omega T_1 - \operatorname{arctg} \omega T_5 - \operatorname{arctg} \omega T_{\text{дв}} - 0,5\pi = \gamma_{\text{пред}}. \quad (3.16)$$

Значения частотного показателя колебательности M рекомендуется [84] выбирать в пределах 1,1–1,8.

При этом согласно (3.13) предельный запас устойчивости по модулю C равен 0,91 – 0,56.

При любых изменениях параметров САУ система не теряет устойчивости, хотя теоретически она будет находиться на границе устойчивости, что является ограничением на коэффициент передачи адаптивного нечеткого регулятора.

На рис. 3.11 представлено графическое представление гарантированного запаса устойчивости по амплитуде и фазе для системы управления двигателем по параметру температуры газов. Здесь $M = 1,012$, радиус окружности «опасной» области $r = 41,915$, расстояние удаления центра окружности «опасной» области от начала координат $R = 42,418$.

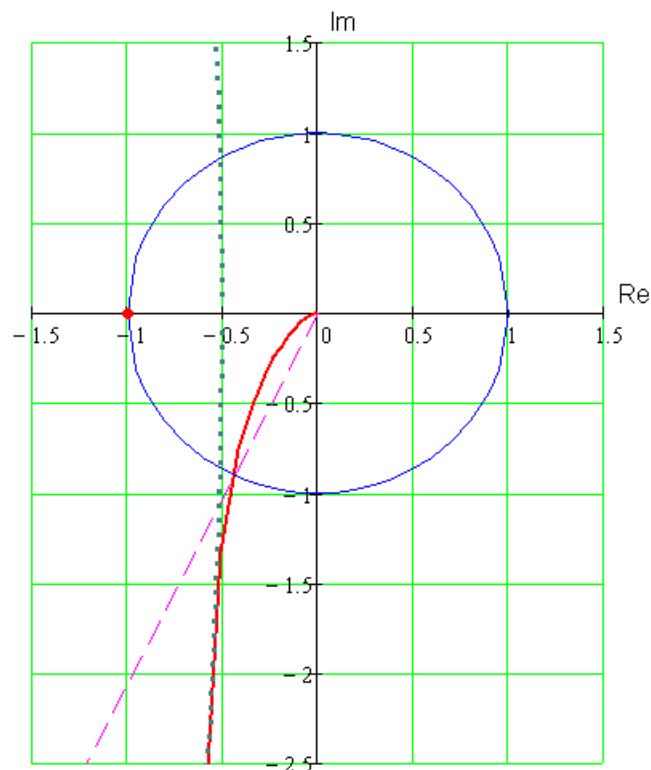


Рис. 3.11. Графическое представление гарантированного запаса устойчивости по амплитуде и фазе для системы управления двигателем по параметру температуры газов, где

- 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 $(-42.418, j0)$.

Таким образом, запас устойчивости по амплитуде согласно (3.15) равен

$$C \approx 0.5,$$

а запас устойчивости по фазе в соответствии с (3.16)

$$\gamma_{\text{пред}} = 1.034 \text{ рад} = 59,27 \text{ град.}$$

Данный пример доказывает, что при изменениях параметров, не выходящих за границу «опасной» области система управления не потеряет устойчивости по амплитуде, хотя теоретически она будет находиться на границе устойчивости.

Полученные результаты могут быть использованы в системах управления ВРД, в том числе в бортовой авиационной аппаратуре двигателей летательных аппаратов.

3.6 Исследование гарантированной устойчивости адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров в условиях неопределенности параметров объекта управления

Исследование гарантированной устойчивости адаптивного нечеткого регулятора, соответствующего модели №2 и содержащего в своем составе адаптивный фильтр выполнено путем проверки работы регулятора с объектом управления, имеющим некорректное математическое описание.

На рис.3.12...рис. 3.15 приведены осциллограммы изменения параметров двигателя при имитации некорректного математического описания объекта управления. Некорректное математическое описание реализовано путем увеличения наклона скоростной характеристики дозатора в 10 раз, что соответствует увеличению коэффициента усиления замкнутой системы управления в 10 раз.

Как показал эксперимент, замкнутая система управления с адаптивным нечетким регулятором управления расходом топлива (на рис. 3.14 график переходного процесса изображен линией gtb_j) сохранила устойчивость. Полученный переходный процесс имеет апериодический характер.

Замкнутая система регулирования с классическим ПИД-регулятором управления расходом топлива (на рис. 3.14 график переходного процесса изображен линией gt_i) находится на границе устойчивости. Переходный процесс

при работе такой системы управления характеризуется наличием затухающего колебательного характера переходного процесса с перерегулированием $\sigma = 3\%$.

По виду графика экспериментально полученного переходного процесса определена частота среза замкнутого контура регулирования $\omega_{\text{ср}} = 100$ рад/с, что соответствует увеличенному в 10 раз коэффициенту усиления объекта управления.

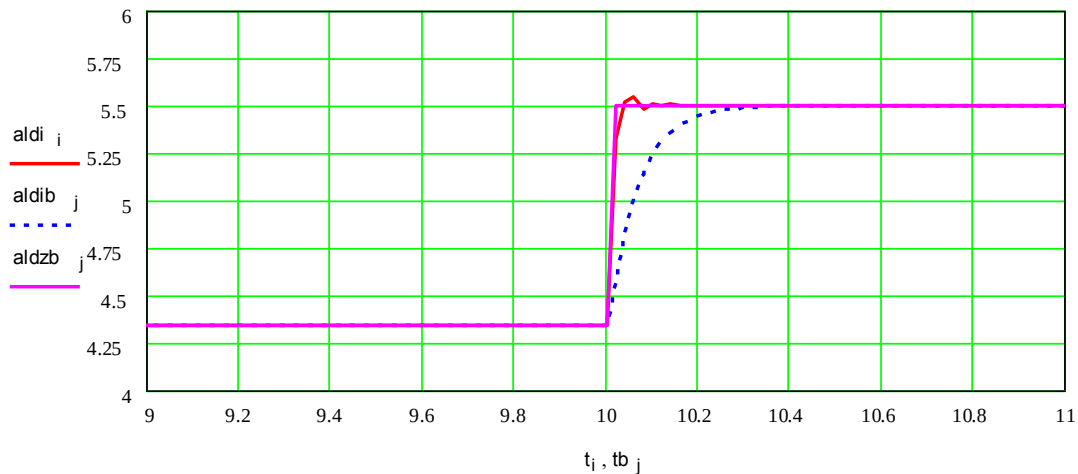


Рис.3.12. Осциллограммы изменения программного и фактического значения положения дозирующей иглы

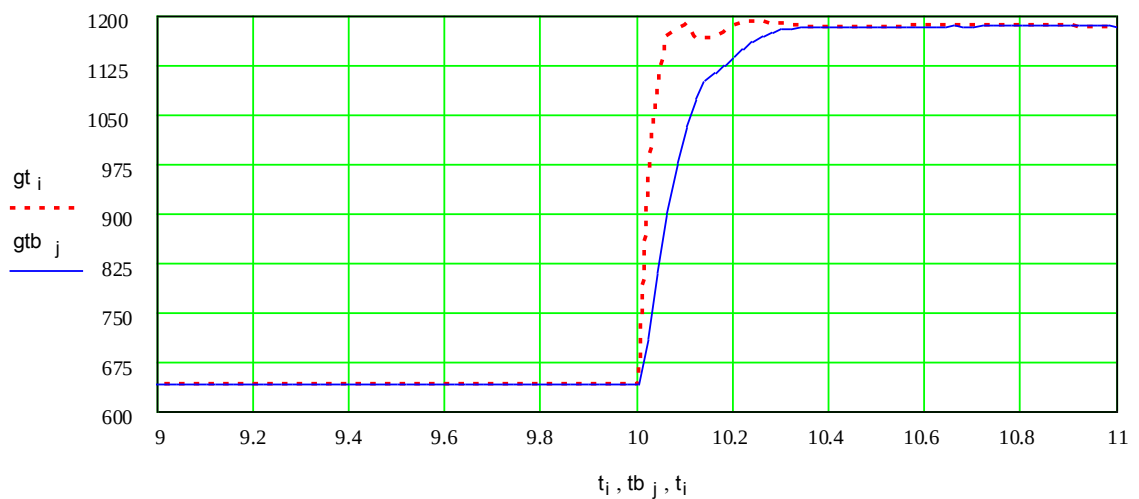


Рис.3.13. Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания

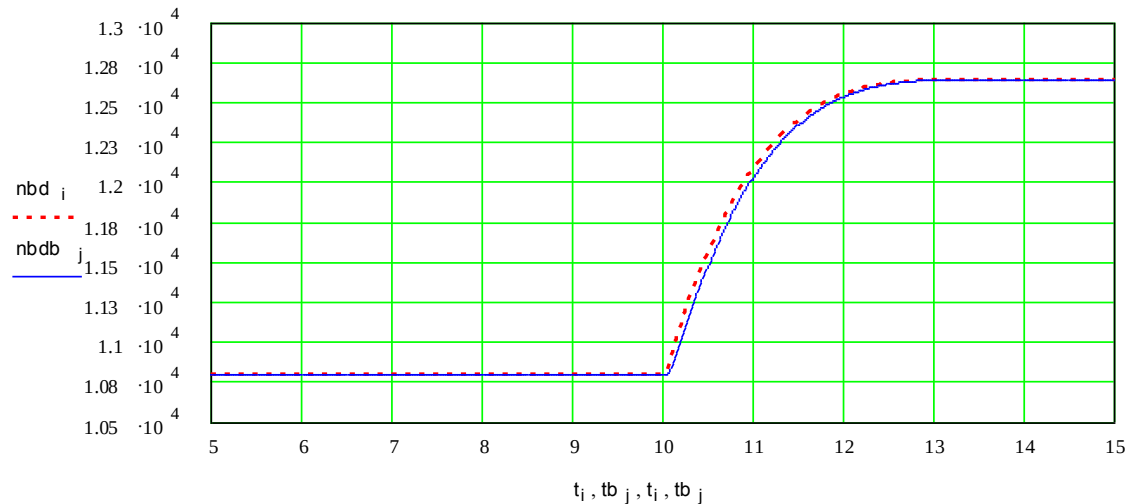


Рис.3.14. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора КВД

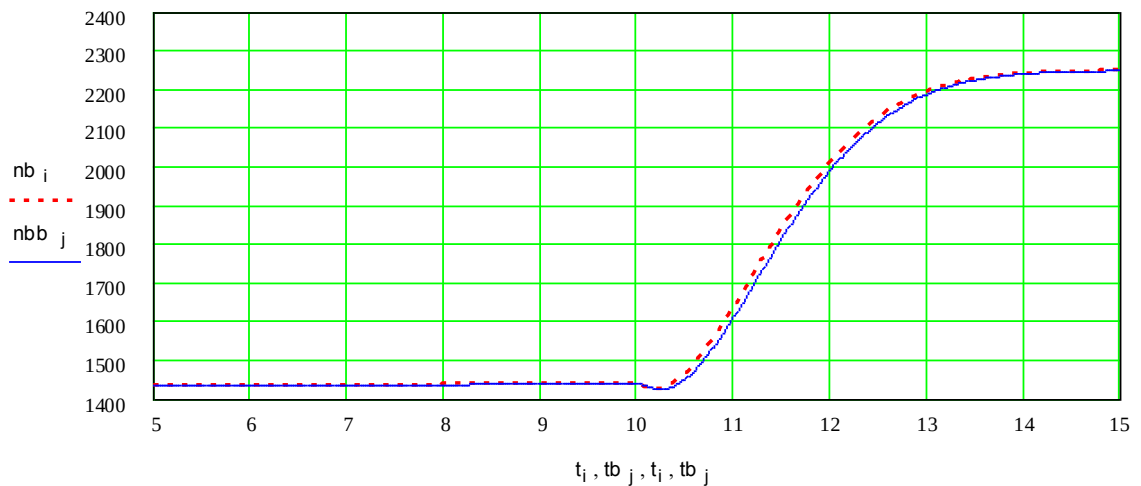


Рис.3.15. Осциллограммы изменения частоты вращения силовой турбины

На рис.3.16...рис.3.19 приведены осциллограммы изменения параметров двигателя при имитации некорректного математического описания объекта управления. Некорректное математическое описание реализовано путем увеличения наклона скоростной характеристики дозатора в 15 раз, что соответствует увеличению коэффициента усиления замкнутой системы управления в 15 раз. В замкнутой системе управления возмущение задавалось изменением положения РУД с 10 до 15 градусов. за время 0,1с.

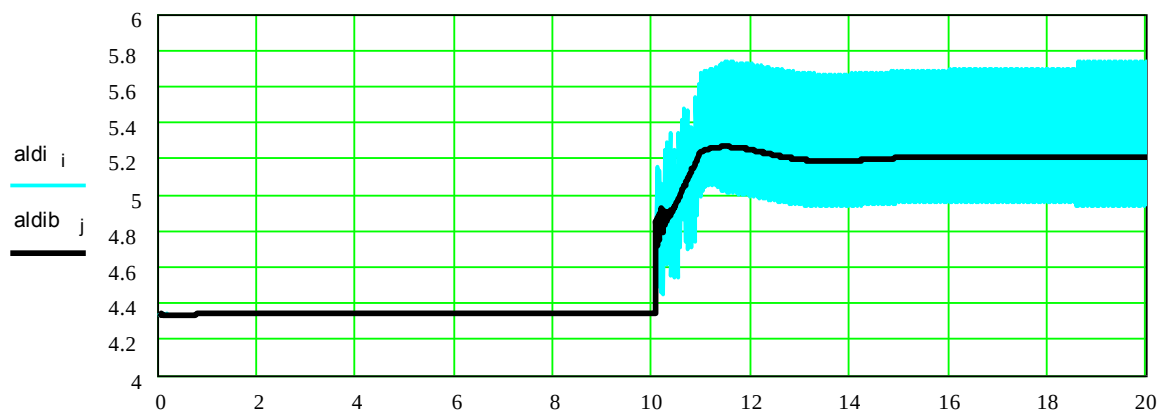


Рис.3.16. Осциллограммы изменения фактического значения положения дозатора

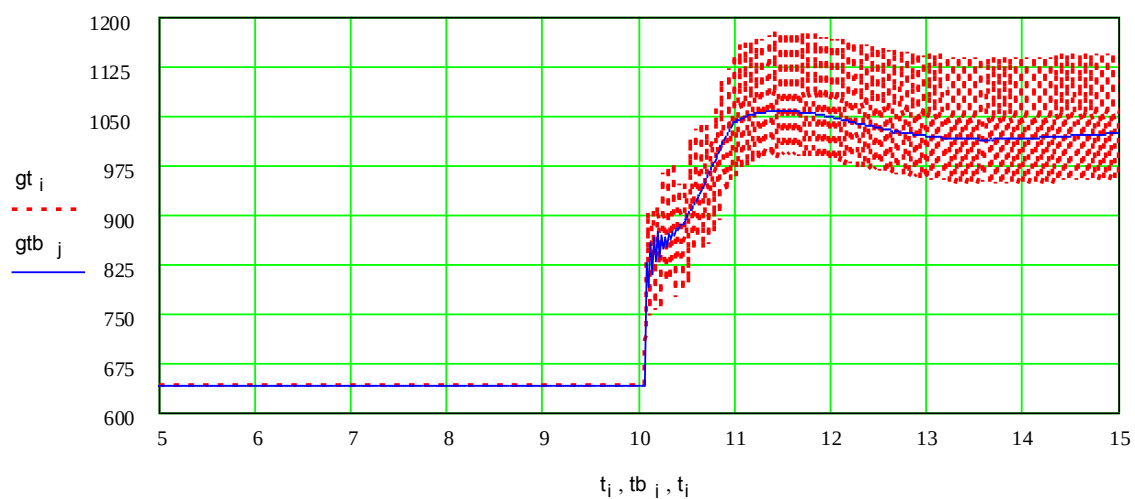


Рис.3.17. Осциллограммы изменения расхода топлива в камеру сгорания ТРДД

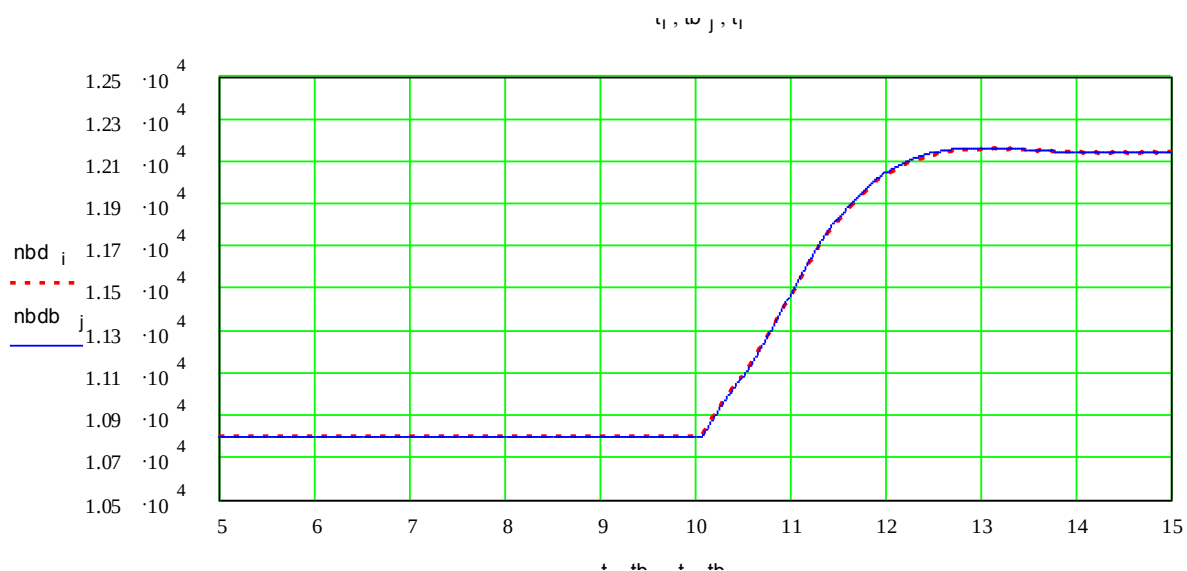


Рис.3.18. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора КВД

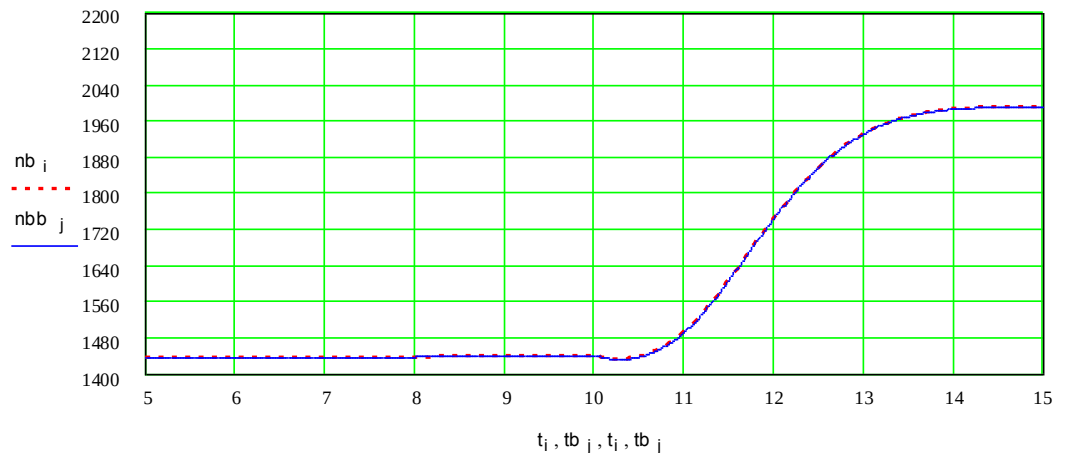


Рис.3.19. Осциллограммы изменения частоты вращения силовой турбины

Как показал эксперимент, замкнутая система управления с адаптивным нечетким регулятором и адаптивным фильтром, соответствующая модели №2 сохранила устойчивость (на рис. 3.19 график переходного процесса изображен синей линией). Характер переходного процесса апериодический.

Замкнутая система регулирования с классическим регулятором управления расходом топлива (на рис. 3.19 график переходного процесса изображен красной пунктирной линией) потеряла устойчивость. Характер переходного процесса работы системы управления с классическим контуром управления положением дозатора представляет колебательный переходный процесс. В замкнутой системе управления возникли незатухающие колебания.

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

Как показали проведенные исследования, в условиях действия параметрических возмущений, обусловленных некорректностью описания объекта управления, качество регулирования классического регулятора недостаточно в связи с отсутствием адаптивных свойств. В то время как предложенный адаптивный нечеткий регулятор имеет лучшие показатели быстродействия и качества, обладает гарантированным запасом устойчивости.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Предложен метод количественной оценки инерционности объекта управления с помощью теории чувствительности. Метод позволяет повысить качество управления ВРД за счет учета в системе управления изменение инерционности объекта управления на разных режимах работы двигателя. В существующей практике корректирующие звенья имеют неизменяемые характеристики и не могут корректно парировать изменение динамических свойств объекта управления. В этой связи актуально усовершенствование алгоритмов управления на основе количественной оценки инерционности объекта управления, которая придает корректирующим звеньям, в частности фильтрам, адаптивные свойства и как сигнал виртуального датчика, может быть введена в систему управления.

Метод апробирован на примере исследования изменения параметра температуры газа двигателя. Рассчитана количественная величина инерционности объекта управления для коррекция постоянной времени адаптивного фильтра по данному параметру управления двигателем.

2. Предложен метод обеспечения гарантированного запаса устойчивости замкнутой системы управления на основе модифицированного критерия Найквиста при возможных вариациях параметров элементов системы управления.

В замкнутой САУ с адаптивным нечетким регулятором и адаптивным фильтром обеспечивается гарантированный запас устойчивости при возможных вариациях параметров элементов системы управления. Проведенные исследования по обеспечению гарантированного запаса устойчивости, в условиях действия параметрических возмущений, обусловленных некорректностью математического описания объекта управления, показали что 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 с применением классического ПИД-регулятора в 15 раз.

4. Внедрение адаптивных нечетких устройств систем управления с гарантированной устойчивостью

В предыдущих главах были предложены модели, методы синтеза адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров, обеспечивающие гарантированный запас устойчивости систем управления на примере систем управления ВРД.

В настоящей главе приведены алгоритмы, программы и результаты реализации разработанных в рамках данной работы адаптивных нечетких регуляторов, работающих в реальном времени в бортовой авиационной аппаратуре, на примере контуров управления параметрами ВРД.

Для сопоставления результатов работы разработанных адаптивных нечетких регуляторов использованы элементы системы управления частотой вращения вентилятора, в качестве прототипа объекта настоящего исследования, реализованные ПИД-регулятором, представлены на рис. 4.1.

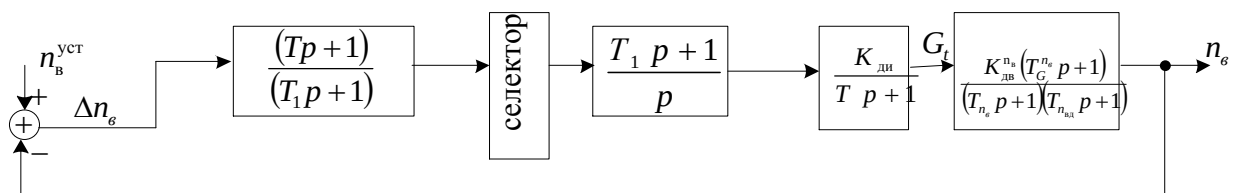


Рис. 4.1. Структурная схема ПИД-регулятора частоты вращения вентилятора ВРД

В соответствии с предложенной методикой выполнен синтез адаптивного нечеткого регулятора. Элементы системы управления частотой вращения вентилятора, реализованные адаптивным нечетким регулятором, алгоритм работы синтезированного адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора по отклонению и по скорости изменения частоты вращения, представлены на рис. 4.2... рис. 4.6.

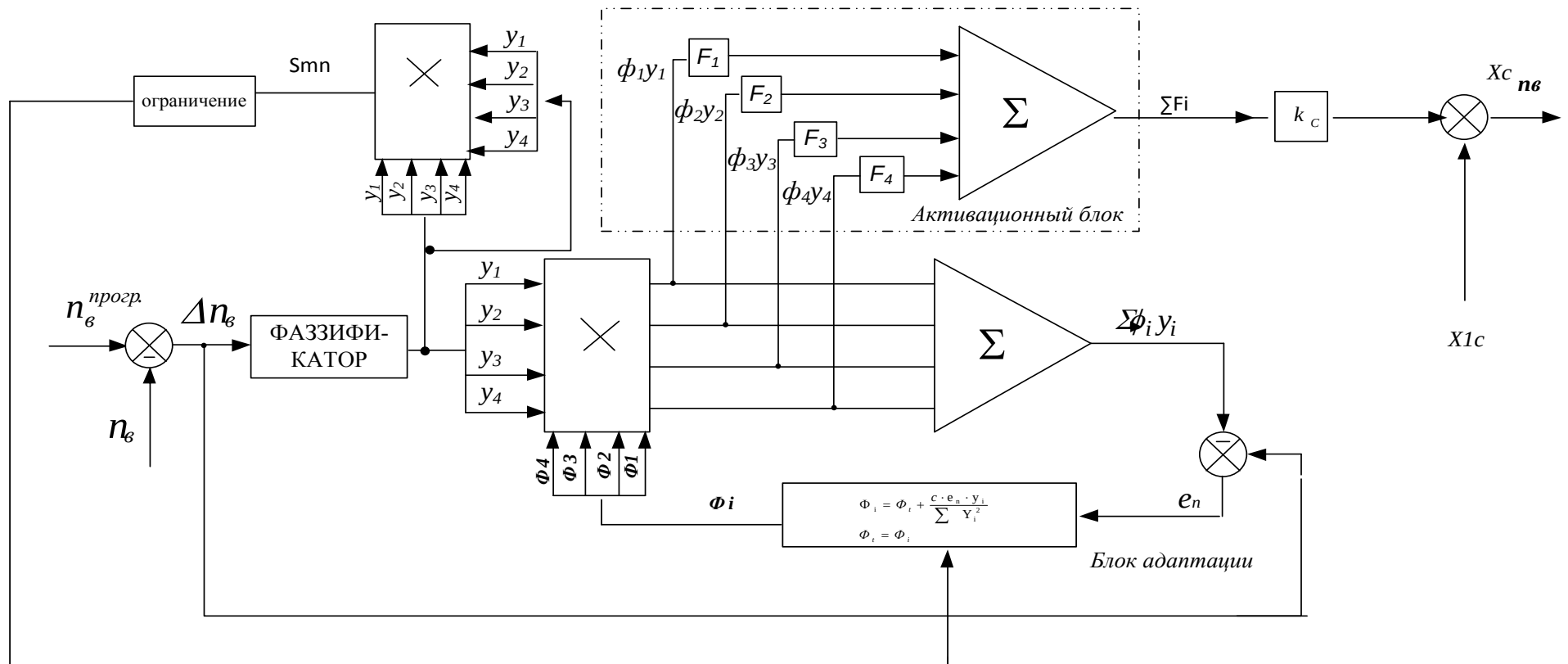


Рис. 4.2. Структурная схема разработанного адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора по отклонению

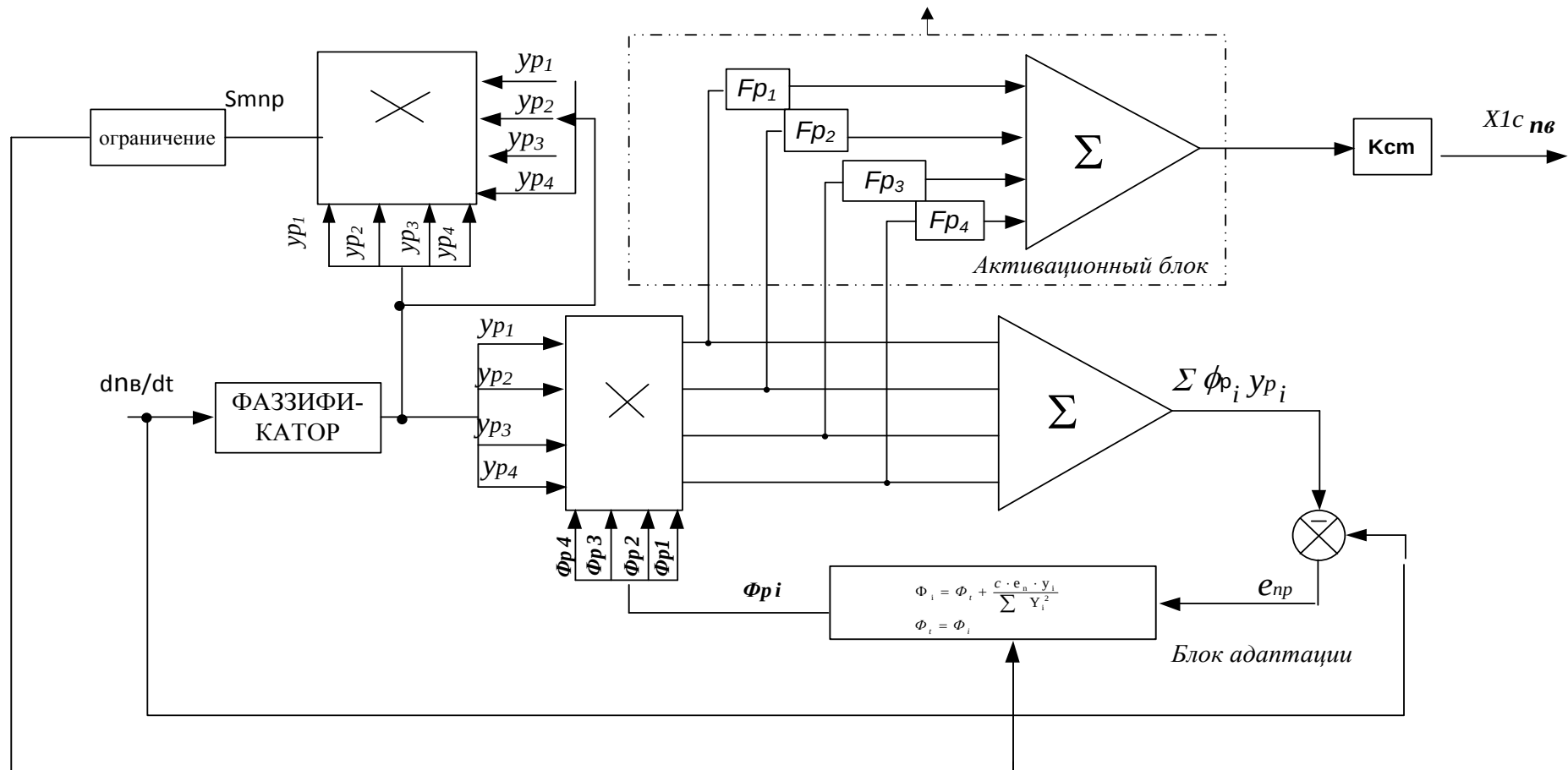


Рис. 4.3. Структурная схема разработанного адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора по скорости изменения частоты вращения

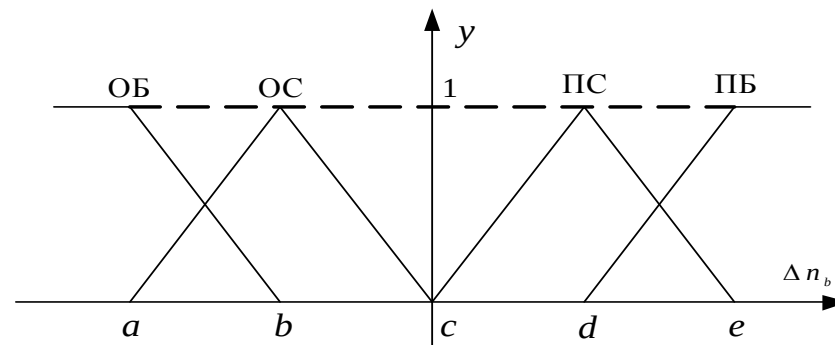
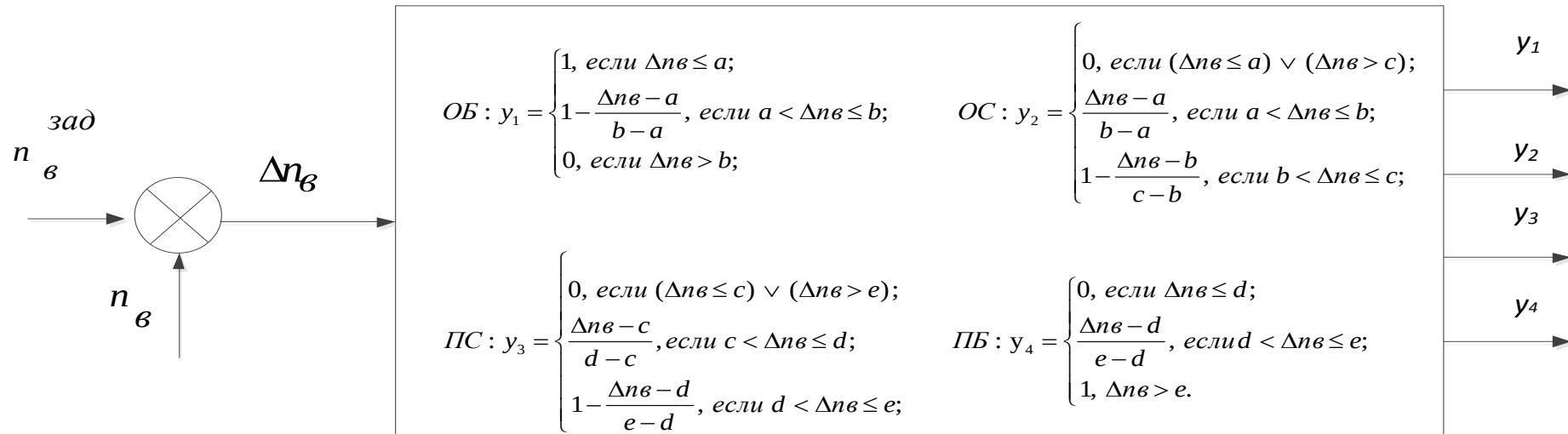


Рис. 4.4. Терм-множество фаззификатора

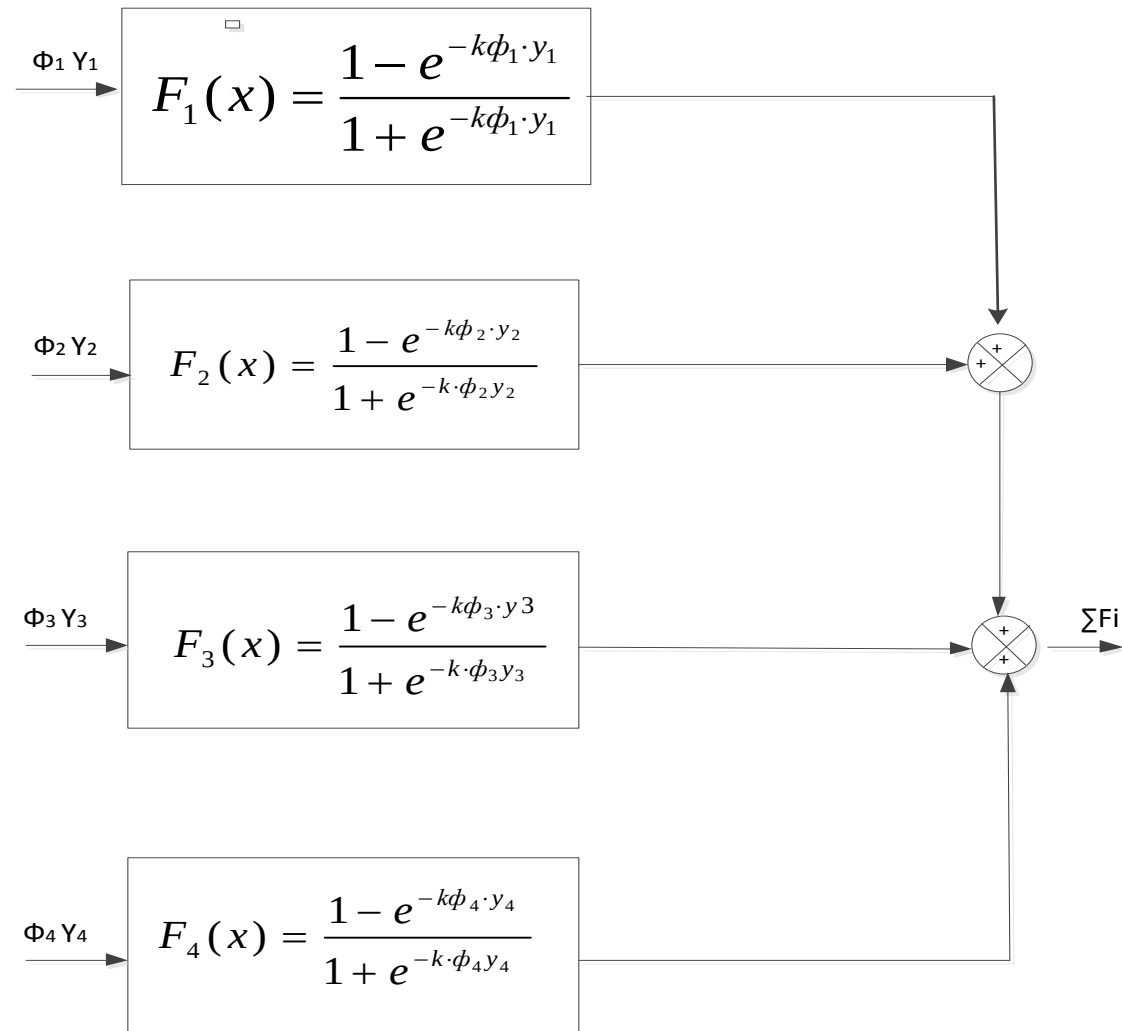


Рис. 4.5. Алгоритм работы активационного блока

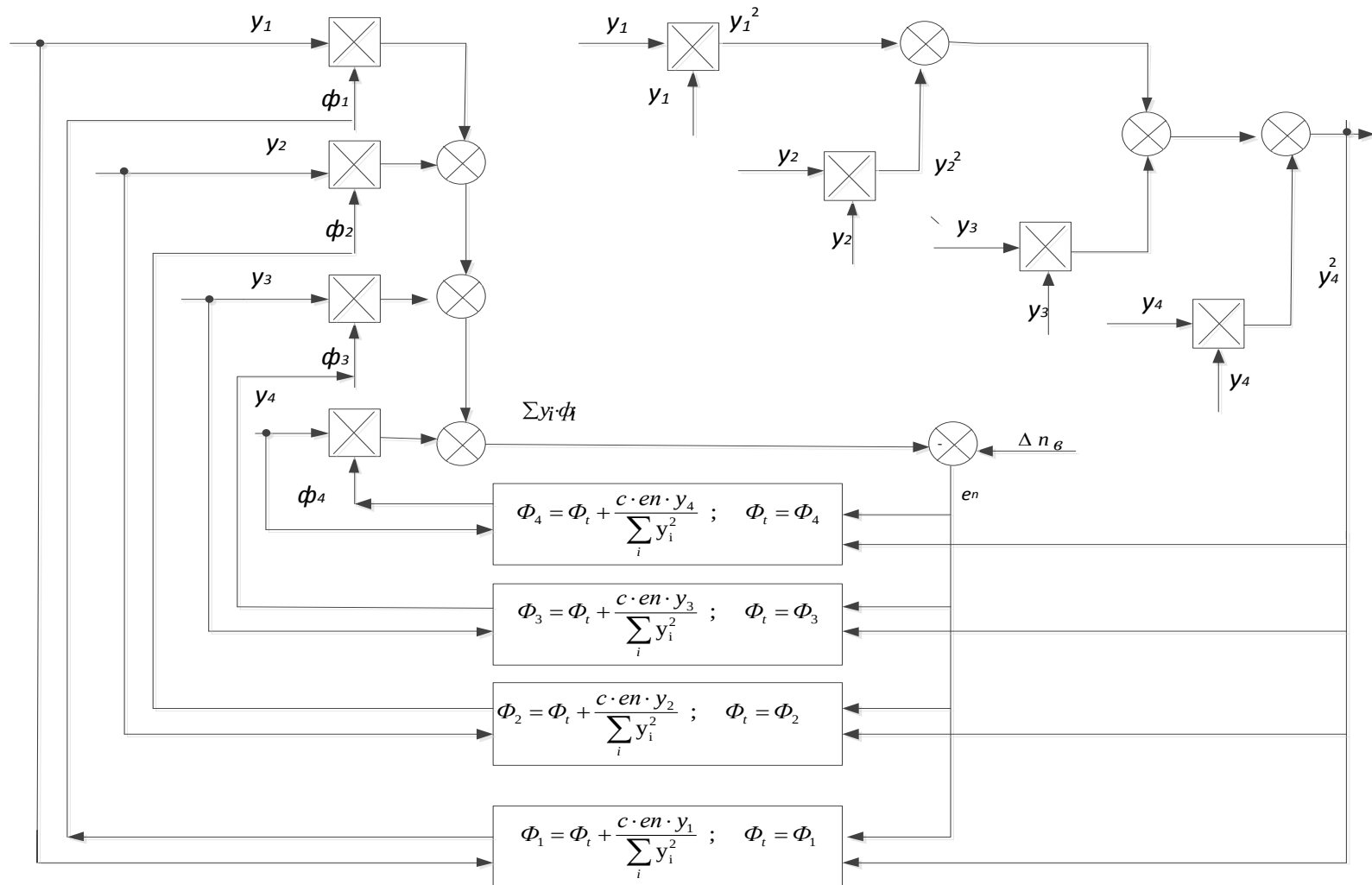


Рис. 4.6. Алгоритм работы блока адаптации фаззификатора

Программа, реализующая алгоритм работы адаптивного нечеткого регулятора, приведена в приложении Е.

Адаптивный нечеткий регулятор реализован в микроконтроллере 1986BE1T «Авионика» производства АО «ПКК Миландр». Аппаратная реализация адаптивного нечеткого регулятора представлена на рис. 4.7.



Рис. 4.7 Аппаратная реализация адаптивного нечеткого регулятора

4.1 Внедрение результатов диссертационной работы в производственный процесс

Для определения работоспособности и корректности предлагаемых решений, разработанные элементы систем управления были внедрены на предприятии, специализирующимся в области разработки систем автоматического управления для воздушно-реактивных двигателей, АО «ОДК-СТАР», г. Пермь

В ходе работы были получены положительные результаты.

Регулятор парирует контролируемое и неконтролируемое изменение параметров объекта регулирования в условиях воздействия возмущающих факторов, например при задуве ветра со стороны сопла ТРДД.

Переходные процессы при увеличении и снижении режима работы двигателя, а также переходный процесс реакции системы на ступенчатое возмущение имеют апериодический характер, исходя из чего можно сделать вывод о достаточном запасе устойчивости системы по амплитуде и по фазе.

Рассмотренные в работе две структурные схемы построения регулятора, с локальной обратной связью по положению дозирующего крана и без него позволяют повысить надежность системы управления в условиях появления отказов и безопасно завершить полет ЛА.

В работе рассмотрены вопросы повышения устойчивости регулятора температуры ТРДД, реализованного в электронных регуляторах типа FADEC: проведены разработка и исследование вариантов адаптивного регулятора температуры газа, адаптации фаззификатора; определено термножество фаззификатора, учитывающее разные варианты схем управления дозатором; определена структурная схема компенсации инерционности датчика температуры.

В рамках данной работы объектом исследования были: регулятор частоты вращения силовой турбины, регулятор частоты вращения ротора компрессора низкого давления ТРДД, регулятор давления воздуха за компрессором высокого давления (КВД), регулятор частоты вращения ротора КВД ТРДД, регулятор ускорения частоты вращения ротора КВД ТРДД, регулятор ограничения расхода топлива в камеру сгорания на приемистости и сбросе режима двигателя.

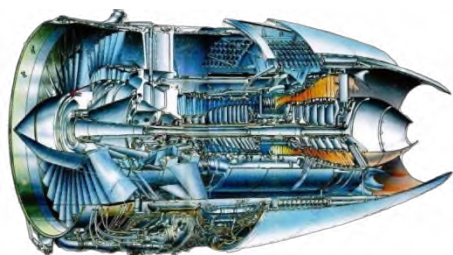
4.2 Результаты промышленной апробации и перспективы использования результатов диссертационной работы в производственном процессе

Результаты диссертационной работы внедрены АО «ОДК-СТАР» при выполнении ОКР по системам автоматического управления ТРДД средней и малой размерности.

Предложенные адаптивные нечеткие регуляторы внедрены в программном обеспечении электронных регуляторов РЭД и КРД указанных выше двигателей. Внедренные адаптивные нечеткие регуляторы соответствуют модели №2 и реализованы на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации и дефаззификатора.

АО «ОДК-СТАР» – первый в стране разработчик цифровых САУ. Работы в этом направлении начались в 80-х годах XX века.

Первой разработкой, внедрённой в серийное производство была система управления для двигателя ПС-90А самолётов Ил-96-300, Ту-204, Ту-214 (рис. 4.8). В настоящее время АО «ОДК-СТАР» выполнена разработка САУ для новейшего ближне-среднемагистрального самолета МС-21.



АО «ОДК-СТАР» – Разработка и производство комплексных САУ ГТД, включающих насосы топливopитания двигателя, цифровые электронные регуляторы.



Рис. 4.8 Система для двигателя ПС-90А

В регуляторе электронного двигателя РЭД адаптивным нечетким регулятором реализована защита [72, 73, 74, 75, 77] от превышения предельных параметров двигателя. Пример ограничителя частоты вращения вентилятора приведен на рис. 4.9. Обеспечен гарантированный запас устойчивости регуляторов по амплитуде и по фазе, обеспечивающих защиту от превышения предельных параметров. Пример графического представления гарантированного запаса устойчивости по амплитуде и фазе приведен на рис. 3.12.

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 каскада 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 объект управления, 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.

Разработаны программы, реализующие адаптивные нечеткие регуляторы. Программы загружены в электронные регуляторы. Проведены сравнительные натурные лабораторные испытания в составе электронных регуляторов на стендах – аналогах двигателя. На стендах – аналогах вся система управления двигателя реализована в натурных агрегатах, включая систему топливопитания, двигатель реализован математической моделью. Стенды-аналоги прошли гос. аттестацию. На них работает аттестованный персонал.

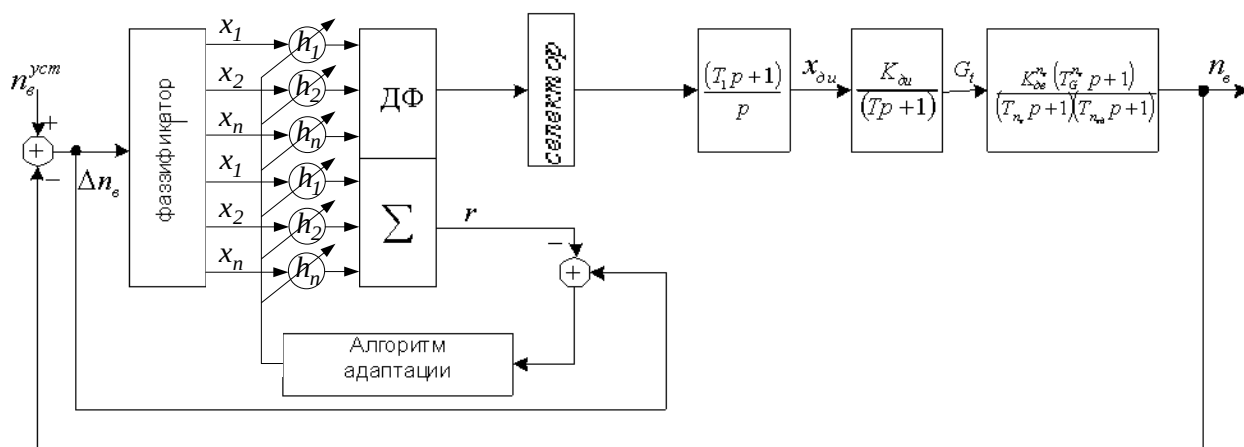


Рис. 4.9. Структурная схема контура частоты вращения вентилятора с включением адаптивного нечеткого регулятора

Ниже приведены результаты экспериментов в АО «ОДК-СТАР» по одному из регуляторов – комплексному регулятору двигателя КРД с адаптивным нечетким регулятором частоты вращения ротора каскада высокого давления. В данной системе управления исполнительный механизм дозирования топлива реализован электромагнитом, работающим в ШИМ-режиме и как релейный элемент системы управления, представляет собой существенную нелинейность.

Представленные результаты зарегистрированы пультом инженерным ПИ. Результаты представлены на рис. 4.10 и 4.11.

На рис. 4.10 приведены переходные процессы работы ПИД-регулятора и адаптивного нечеткого регулятора $n_{вд}$.

В таблице 4.1 приведены значения показателей качества переходных процессов работы ПИД-регулятора и адаптивного нечеткого регулятора $n_{вд}$.

На приведенных рисунках показаны переходные процессы при испытаниях ПО регулятора КРД на испытательном стенде АО «ОДК-СТАР».

Испытания проводились 26.06.2019 г. при заданных параметрах:

На земле при $P_{вх} = 1$ кгс/см²

В воздухе при $P_{вх} = 0.34$ кгс/см²

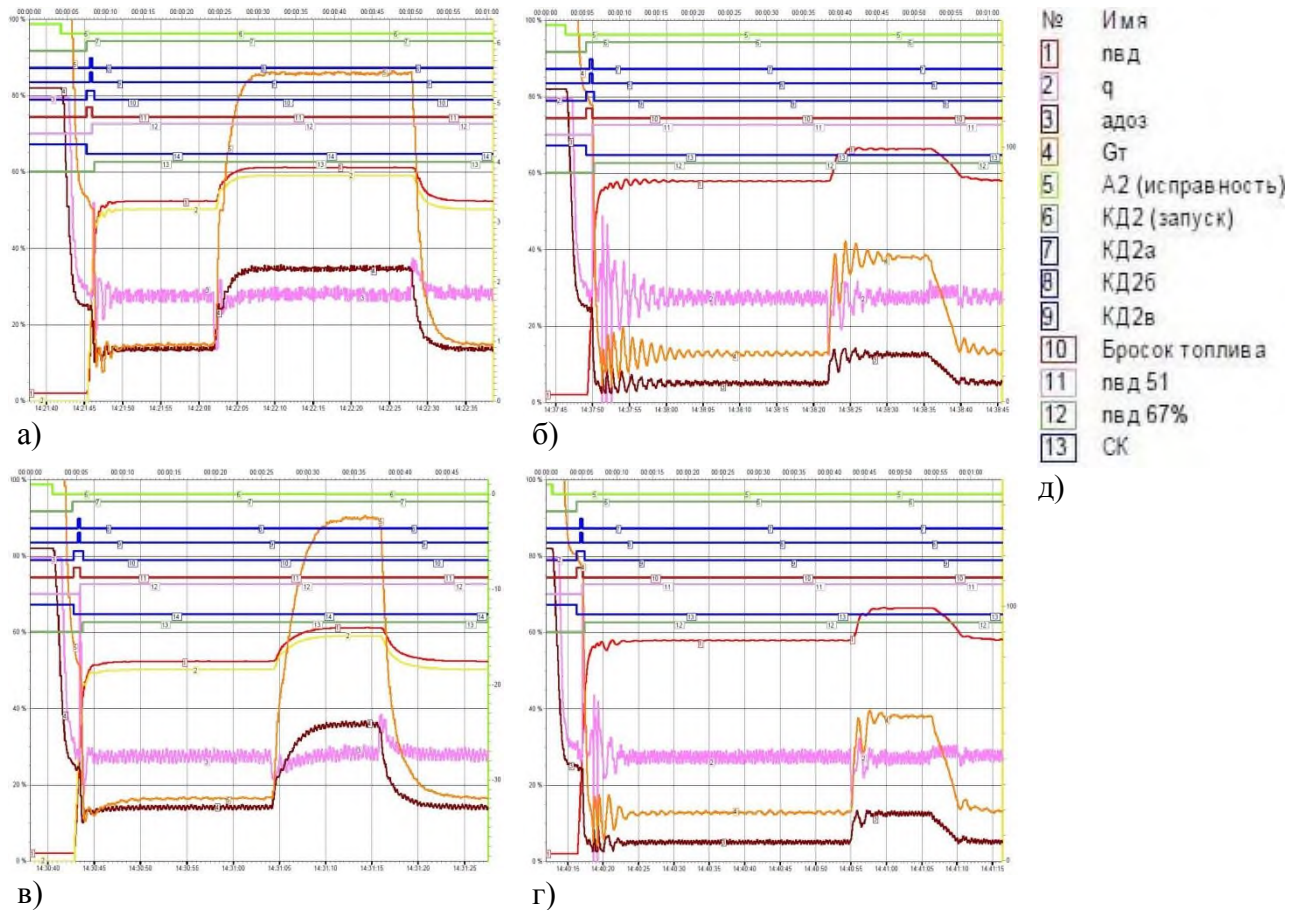


Рис. 4.10 Переходные процессы при работе регулятора n_{60} , где ПИД-регулятор: а) на «земле», б) в полете, адаптивный нечеткий регулятор в) на «земле», г) в полете; д) – параметры контроля

Таблица 4.1. Значения показателей качества переходных процессов при работе ПИД-регулятора и адаптивного нечеткого регулятора n_{60}

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

Элементы системы управления положением дозирующего крана, реализованные адаптивным нечетким регулятором, представлены на рис. 4.12. На

На рис. 4.14 приведены переходные процессы работы адаптивного нечеткого регулятора управления положением дозатора.

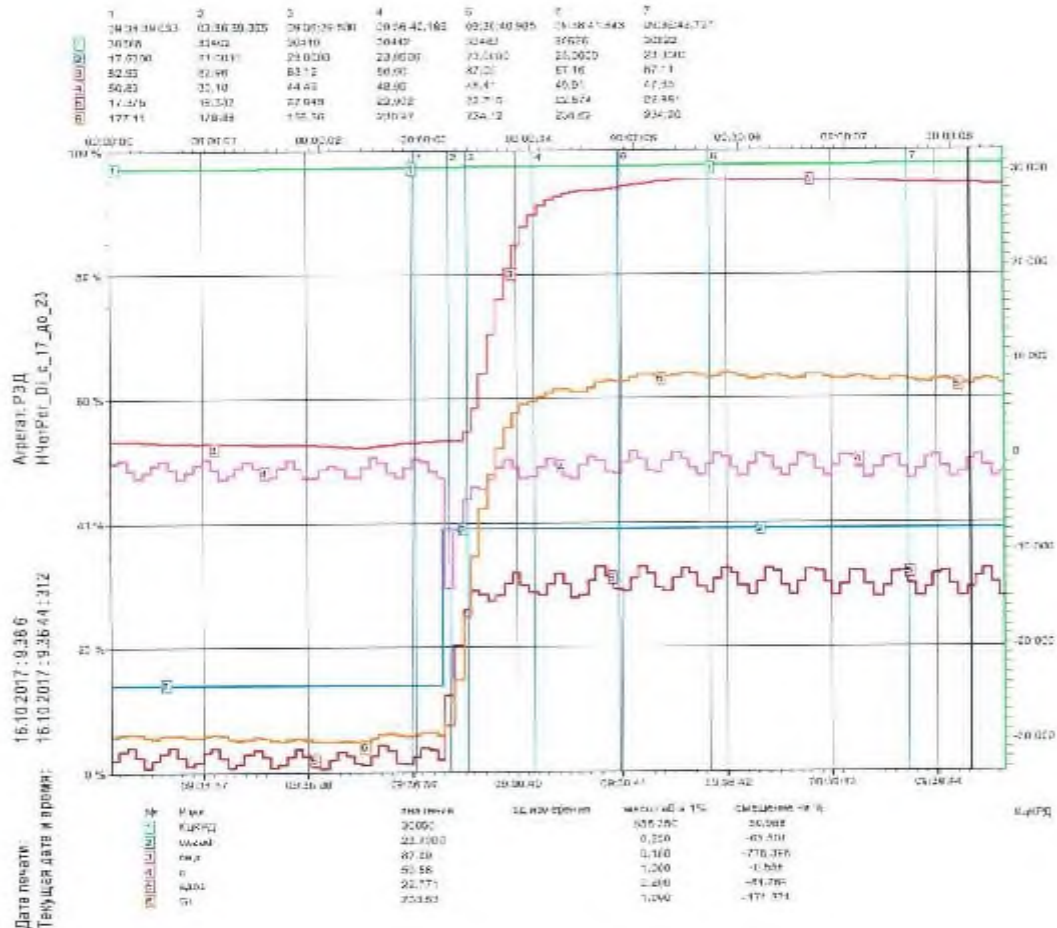


Рис. 4.14. Переходные процессы работы адаптивного нечеткого регулятора положением дозатора

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 дис-

сертационной 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 по фазе по сравнению с текущими показателями, обеспечить устойчивую работу системы управления гидроцилиндрами при увеличении коэффициента усиления замкнутой системы в 15 раз.

Основные результаты приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

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

Предложенные в диссертационной работе решения, основанные на нечетких регуляторах, в ближайшем времени будут использованы при проекти-

ровании контура стабилизации малоэмиссионного режима работы в бортовой системе управления камерой сгорания перспективного ВРД.

4.3 Внедрение результатов диссертационной работы в образовательный процесс

Результаты диссертационной работы «Модели и методы построения адаптивных нечетких регуляторов и адаптивных фильтров при гарантированном запасе устойчивости систем управления» используются также в учебном процессе в рамках программ магистратуры по направлению подготовки 27.04.04 «Управление и информатика в технических системах» для проведения лекционных и практических занятий, лабораторных работ, курсового проектирования.

Предложенные методы создания адаптивных нечетких регуляторов систем управления ВРД с учетом требований систем жесткого реального времени излагаются в теоретических курсах дисциплины «Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени» программы магистратуры «Информационные технологии в проектировании систем реального времени». На основе методов проводятся лабораторные практикумы в составе лабораторных стендов, реализованных в среде моделирования *LabView* фирмы *National Instruments*.

4.4 Выводы по четвертой главе

Приведены алгоритмы, программы и результаты реализации разработанных в рамках данной работы адаптивных нечетких регуляторов, работающих в реальном времени в бортовой авиационной аппаратуре, на примере контуров управления параметрами ВРД.

Результаты диссертационной работы внедрены АО «ОДК-СТАР» при выполнении ОКР по системам автоматического управления ТРДД средней и малой размерности.

Предложенные адаптивные нечеткие регуляторы внедрены в программном обеспечении электронных регуляторов РЭД и КРД указанных выше дви-

гателей.. Внедренные адаптивные нечеткие регуляторы реализованы на основе адаптивного фаззификатора с выбранным алгоритмом адаптации и дефаззификатора.

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 двигателей позволило обеспечить выполнение заданных технических требований по качеству управления в течение жизненного цикла работы двигателя. При этом применение адаптивных нечетких регуляторов, адаптивных фильтров и проектирование системы управления с учетом критерия обеспечения гарантированного запаса устойчивости позволило решить существенную проблему вероятной потери устойчивости замкнутой системы управления по ресурсу, при изменении внешних не измеряемых параметров и обеспечить уменьшение времени переходных процессов регулирования на 15 %, увеличить запас устойчивости по амплитуде и по фазе по сравнению с текущими показателями, обеспечить устойчивую работу системы управления гидроцилиндрами при увеличении коэффициента усиления замкнутой системы в 15 раз.

Результаты диссертационной работы внедрены в производственной деятельности АО «ОДК-СТАР» (приложение Ж). Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, (приложение Ж).

5. 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 пара-

метру 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 объект управления.

Список сокращений и условных обозначений

- АНР – адаптивный нечеткий регулятор;
- АО – акционерное общество;
- ВВ – воздушный винт;
- ВРД – воздушно-реактивный двигатель;
- КВД – компрессор высокого давления;
- ЛА – летательный аппарат;
- МНК – метод наименьших квадратов;
- НВ – несущий винт;
- ОБ – отрицательная большая ошибка регулирования;
- ОКР – опытно-конструкторская работа;
- ОМ – отрицательная малая ошибка регулирования;
- ОРО – обратное распространение ошибки;
- ОС – отрицательная средняя ошибка регулирования;
- ОУ – объект управления;
- П – пропорциональный;
- ПБ – положительная большая ошибка регулирования;
- ПИ – пропорционально-интегральный;
- ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный;
- ПМ – положительная малая ошибка регулирования;
- ПС – положительная средняя ошибка регулирования;
- САУ – система автоматического управления;
- СТ – силовая турбина;
- ТВД – турбовинтовой двигатель;
- ТВaД – турбовальный двигатель;
- ТРДД – турбореактивный двухконтурный двигатель;
- УВВ – устройство ввода воздействия;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
- ЭВМ – электронная вычислительная машина;
- ANFIS – Adaptive Network-based Fuzzy Inference System
- FADEC – Full Authority Digital Engine Control system

Список литературы

1. Августинovich В.Г. и др. // Идентификация систем управления авиационных ГТД. / под общ. ред. В.Т. Дедеша, М., Изд-во: Машиностроение, 1984. – 196 с.
2. Августинovich В. Г., Кузнецова Т. А. //Повышение надежности систем автоматического управления газотурбинными двигателями с применением алгоритмических методов. / Изв. Томского политехнического университета, Т.326, №9, 2015. – С.68–77.
3. Августинovich В. Г., Кузнецова Т. А. //Система автоматической параметрической диагностики газоздушного тракта авиационного двигателя на базе робастной бортовой математической модели. / ЗАО «Издательство «Радиотехника», Информационно-измерительные и управляющие системы, Т.14, №9, 2016. – С.17–23.
- 3а. Авиационные правила. Часть 33.
4. Антонов В. Н., Терехов В. А., Тюкин И. Ю. // Адаптивное управление в технических системах. / учебное пособие, С-Пб., изд-во С-Пб. ун-та, 2001. – 244 с.
- 4а. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. – СПб. : Лань, 2010. – 592 с
5. Бессекерский В.А., Попов Е.П. // Теория систем автоматического управления./ учебное пособие, 4-е издание перераб. и доп., С-Пб, изд-во: Профессия, 2003. – 752 с.
6. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. // Нечеткие модели и сети./ М., Изд-во: Горячая Линия - Телеком, 2007. – 284 с.
7. Батарышкин И. З. Недосенин А. А., Стецко А. А., Тарасов В. Б., Язенин А. В., Ярушкин Н. Г. // Теория и практика нечетких гибридных систем. / Под ред. Н.Г. Ярушкина, М., Изд-во: Физматлит, 2006. – 178 с.
8. Бобырь М. В., Кулабухов С. А., Милостная Н. А. // Обучение нейронечеткой системы на основе метода разности площадей. / Ж-л «Искусственный интеллект и принятие решений» № 4, 2016. – С. 15–26.

9. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. // Деффаззификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей. / Ж-л «Вестник компьютерных и информационных технологий» № 9, 2015. – С.32– 41.
10. Васильев С. Н. // От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. / Изв. РАН, Теория и системы управления, 2001, № 2.
11. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. // Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. / учебное пособие, М., изд-во: Радиотехника, 2009.– 392 с.
12. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. // Интеллектуальные системы с использованием нечеткой логики. / учебное пособие, Уфа, УГАТУ, 1995.
13. Васильев В. И., Идрисов И. И., Макаров А. С. // Нейросетевые технологии проектирования систем управления авиадвигателем./ статья на англ. яз., Инновационные информационные технологии: труды российско–немецкого сем., Уфа, 2009. – С. 72–77.
14. Васильев В. И., Идрисов И. И., Каримов И. А., Макаров А. С. // Проектирование и техническая реализация интеллектуальных систем управления авиационными газотурбинными двигателями / Под. ред. акад-ка. С. Н. Васильева, Интеллектуальные системы управления, М., изд-во: Машиностроение, 2010. – С. 142–153.
15. Васильев В. И., Идрисов И. И., Макаров А. С. // Вопросы синтеза и технической реализации нейросетевых алгоритмов управления газотурбинным двигателем. / Нейрокомпьютеры: разработка, применение, № 5, 2010.– С. 44–52.
16. Васильев В. И., Идрисов И. И., Макаров А. С. // Нейросетевые технологии в задачах управления и контроля авиационных двигателей. / Системы управления и информационные технологии, № 1.1 (43). 2011. – С. 122–126.
17. Васильев В. И., Идрисов И. И., Макаров А. С. // Синтез и программно–аппаратная реализация нейросетевой системы управления ГТД с селек-

- тированием каналов. / Нейрокомпьютеры: разработка, применение, № 9, 2011.– С. 72–78.
- 18.Васильев В. И., Идрисов И. И., Макаров А. С. // Проектирование перспективной нейросетевой системы управления ГТД. / статья на англ. яз., CSIT'2009: тр. 11-го 16 международного семинара по компьютерным наукам и информац. технологиям. Крит, Греция, 2009.– С. 13–18.
 - 19.Власов К. П. //Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета./ учебное пособие, 2-е издание исправл. и дополн., Х., изд-во: Гуманитарный центр, 2013. – 544 с.
 - 20.Видадь П. //Нелинейные импульсные системы./ М., изд-во: Энергия, 1974. – 336 с.
 - 21.Густав Олсоон, Джангуидо Пиани //Цифровые системы автоматизации и управления. / С-Пб., Изд-во: Невский диалект, 2001. – 550 с.
 - 22.Гропп Д. // Методы идентификации систем./ М., изд-во: Мир, 1979.
 - 23.Гостев В. И. // Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления./ С-Пб., изд-во: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
 - 24.Гостев В. И., Перечный В. Н., Синеуцкий И. В. //Оптимальное по быстродействию управление в дискретных системах с насыщением. / ж-л «Автоматика» №2, 1988. – С. 56–61.
 - 25.Гостев В. И. // Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления./ К., Изд-во: Радиомотор, 2008. 972 с.
 - 26.Герман-Галкин С. Г. // Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0./ С-Пб., изд-во: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
 - 27.Гузаиров М. Б., Муравьева Е. А., Соловьев К. А. // Компьютерная модель функции выходной мощности паровой винтовой машины. / Вестник УГАТУ, научн. ж-л. УГАТУ № 1(46), Т. 16, 2012. – С. 106–111.
 - 28.Гузаиров М. Б., Муравьева Е. А. // Управление технологическими процессами, реализованное на четких логических регуляторах - монография. / М., Изд-во: Машиностроение, 2012. – 305 с.

29. Гоппе Г. Г., Колесников А. В. // Исследование алгоритма автоматической оптимизации каскадной системы регулирования / Труды НТК «Электроизоляционная и кабельная техника. Промышленная электротехника», Иркутск, изд-во: ИЛИ, 1973. – С. 185–192.
30. Деменков Н. П. // Программные средства оптимизации настройки систем управления./ учебное пособие, М., изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 244 с.
31. Ерофеев А. А. // Теория автоматического управления./ учебник для вузов, 2-е издание перераб. и доп., С-Пб, изд-во: Политехник, 2001. – 302 с.
32. Заде Л. А. // Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. / М., изд-во: Мир, 1976. – 165 с.
- 32а. Иванов И. И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Лань, 2012. – 736 с
33. Клячкин А. Л. // Теория воздушно-реактивных двигателей./ М., изд-во: Машиностроение, 1969.
34. Круглов В. В., Голунов Р. Ю. // Нечеткая логика и искусственные нейронные сети./ М., изд-во: Физматлит, 2001. – 224 с.
35. Круглов В. В., Дли М. И. // Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода. / М., изд-во: Физматлит, 2002.
36. Колесников А. А. // Каскадный синтез систем синергетического управления нелинейными объектами./ диссертация к.т.н. 05.13.01, С-Пб., 2001. – 276 с.
37. Леготкина Т. С., Данилова С. А. // Методы идентификации систем. / Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 155 с.
38. Лукас В. А. // Теория управления техническими системами./ учебное пособие для вузов, 4-е издание исправленное, Екатеринбург, изд-во: УГГУ, 2005. – 677 с.

39. Муравьева Е. А., Каяшева Г. А. // Нечеткие регуляторы с anytime-алгоритмом минимизации времени фаззификации параметров технологических процессов в совокупность четких термов. / Вестник УГАТУ, науч. ж-л. «Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та» № 2 (27) Т. 10, 2008. – С. 53–57.
40. Муравьева Е. А., Каяшева Г. А., Байманов И. Ф. // Нечеткая система регулирования величины рН электролита в производстве хлора методом электролиза./: науч.-техн. ж-л «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности» № 1, М., ОАО «ВНИИОЭНГ», 2008. – С. 10– 13.
41. Муравьева Е. А., Каяшева Г. А. // Нечеткий регулятор с лингвистической обратной связью для управления технологическими процессами./ патент № 2309443 от 27.10.2007.
42. Макарова И. М., Лохина В. М. // Интеллектуальные системы автоматического управления./ учебное пособие, М., изд-во: Физматлит, 2001.
43. Медведев М. Ю. // Управление нелинейными многосвязными объектами в условиях неопределенности. / автореферат диссертации д.т.н. 05.13.01, [Место защиты: Юж. федер. ун-т], Таганрог, 2010. – 32 с.
44. Пономарев Б. А. // Двухконтурные турбореактивного двигателя./ М., изд-во: Воениздат, 1973. – 133 с.
45. Пегат А. // Нечёткое моделирование и управление./ пер. с англ., М., изд-во: Бином, 2009. – 798 с.
46. Ротач В. Я. // Теория автоматического управления./ учебник для вузов, 3-е издание перераб. и дополн., М., изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
47. Рутковская Д., Рутковский Л., Пилиньский М.,// Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы./ перевод с польск. И. Д. Рудинского, М., изд-во: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
48. Синяков А. Н., Шаймарданов Ф. А. // Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками./ М., Изд-во: Машиностроение, 1991.– 320 с.

- 49.Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф // Нейроуправление и его приложения. Neuro-Control and its Application. / 2-е издание, М., ИПРЖР, 2000. – 272 с.
- 50.Сазонова Т. В. // Управление автоклавом на основе многомерного нечеткого регулятора с интервальной неопределенностью. / диссертация к.т.н., Оренбург, 2013. – 195 с.
- 51.Сагдатуллин А. М. // Fuzzy-регуляторы для управления быстродействующими и многомерными технологическими процессами. / Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института, 2014. – № 2. Том 1. – С. 63–67.
- 52.Система возбуждения бесщеточная диодная цифровая типа СВБДЦ для турбогенераторов мощностью 2,6...32 МВт (6ФА.360.385 РЭ). / Руководство по эксплуатации, Лысьва, 2004. – 65 с.
- 53.Титов Ю. К., Южаков А. А., Хижняков Ю. Н. // Проектирование адаптивного нечеткого регулятора положения дозатора ВРД. / ж-л «Электротехника» №11, 2018. – С. 6–11.
- 54.Титов Ю. К., Хижняков Ю. Н., Дудкин Ю. П., Филиппенков Р. Г. // Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя. / Вестник Московского авиационного института (государственный технический университет). – Т.17, № 6, 2010. – С. 55 – 60 и в сборнике научных трудов «Системы мониторинга и управления», ПГТУ, Пермь, 2008.
- 55.Титов Ю. К., Хижняков Ю. Н., Филиппенков Р. Г. // Нейро-нечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины ТВД на базе *Anfis*-сети. / ж-л «Мехатроника, автоматизация, управление» №10, 2013. – С. 20–23.
- 56.Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г. // Способы нейро-нечеткого управления частотой вращения силовой турбины турбовального двигателя./ Механика и процессы управления, том 2, материалы XXXXI Всероссийского симпозиума, М., изд-во РАН, 2011г.

57. Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г. // Применение нечеткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя. / Итоги диссертационных исследований, том 1, материалы III Всероссийского конкурса молодых ученых, М., изд-во РАН, 2011 г.
58. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Матушкин Н. Н., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Адаптивное управление авиационного двигателя в условиях неопределенности. / ж-л «Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева», Т.69, №4, 2013. – С. 240–246.
59. Титов Ю. К., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Алгоритм повышения качества контуров управления авиационного двигателя. / ж-л «Электротехника» №11, 2013. – С. 28–31.
60. Титов Ю. К., Хижняков Ю. Н. // Методика проектирования нечеткого астатического регулятора напряжения СГ средней мощности. / 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.
61. Титов Ю. К., Хижняков Ю. Н. // Адаптивное нечеткое управление газотурбинным двигателем. / Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления», ЮУрГУ, Челябинск, 2013.
62. Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Разработка адаптивного нейро-нечеткого регулятора частоты вращения вентилятора ТРДД. / ж-л «Известия ВУЗов. Электромеханика» №2, 2013 г.
63. Титов Ю.К., Дудкин Ю.П., Филиппенков Р.Г. // Методы робастности в процедуре обнаружения и изоляции отказов датчиков на основе математической модели авиационного газотурбинного двигателя. / Механика и процессы управления. Труды XXXIX Уральского семинара, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева, Екате-

- ринбург: УрО РАН, 2009. и в //сборнике научных трудов «Системы мониторинга и управления», ПГТУ, Пермь, 2010.
64. Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г.// Контроль вибросостояния газотурбинного двигателя с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье./ Сборник научных трудов «Системы мониторинга и управления», ПГТУ, Пермь, 2009.
 65. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н. // Разработка алгоритма встроенной математической модели обнаружения отказов датчиков газодинамических параметров двигателя ПС-90А2. / Сборник научных трудов «Системы мониторинга и управления», ПГТУ, Пермь, 2007.
 66. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н. // Применение встроенной в регулятор математической модели двигателя ПС-90А2 в целях повышения контроллепригодности системы автоматического управления./ Тезисы докладов XXVII Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 150-летию К.Э. Циолковского, 100-летию С.П. Королева и 60-летию Государственного ракетного центра "КБ им. академика В.П. Макеева", Миасс, 2007.
 67. Титов Ю.К., Дудкин Ю.П., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н.// Разработка алгоритма встроенной в регулятор адаптивной математической модели двигателя ПС-90А2, основанной на применении нейронных сетей./ Наука и технологии, труды XXVII Российской школы, М., изд-во: РАН, 2007.
 68. Титов Ю.К., Филиппенков Р.Г. // Способы адаптивного нейронечеткого управления частотой вращения силовой турбины турбовального двигателя. / Материалы 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012».
 69. Титов Ю.К., Дудкин Ю.П., Филиппенков Р.Г., Хижняков Ю.Н. // Разработка алгоритма встроенной математической модели двигателя ПС-90А2 для обнаружения отказов датчиков газодинамических парамет-

- ров. / Сборник научных трудов конференции «Політ-2007», Национальный авиационный университет, Украина, Киев, 2007.
70. Титов, Ю.К. Использование перспективных алгоритмов управления САУ для повышения надежности и точности регулирования. Адаптивное управление газотурбинного двигателя с применением нейронечетких 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 г.).
- 70а 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.
71. Титов Ю.К., Дудкин Ю.П., Гладких В.А., Фомин Г.В., Остапенко С.В., Шарифуллин Ю.Г. Патент РФ на изобретение № 2392468 «Способ управления расходом топлива на запуске газотурбинного двигателя»/ Заявка: 2008117244/06, 29.04.2008; дата подачи заявки: 29.04.2008; дата публикации заявки: 10.11.2009 Бюл. № 31, опубликовано: 20.06.2010 Бюл. № 17.
72. Титов Ю.К., Дудкин Ю.П., Гладких В.А., Фомин Г.В. Патент РФ на изобретение № 2329388 «Способ защиты газотурбинного двигателя» / Заявка: 2011100598/06, 05.10.2006; дата подачи заявки: 05.10.2006; опубликовано: 20.07.2008 Бюл. № 20.
73. Титов Ю.К., Савенков Ю.С., Саженков А.Н. Патент РФ на изобретение №2618171 «Способ управления авиационным газотурбинным двигателем на взлетном режиме при пожаре»/ Заявка: 2015146867, 30.10.2015; дата подачи заявки: 30.10.2015; опубликовано: 02.05.2017 Бюл. № 13.
74. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Гладких В. А., Фомин Г.В., Остапенко С.В. Патент РФ на изобретение № 2468229 «Способ контроля системы

- управления газотурбинным двигателем» / Заявка: 2010146104/06, 11.11.2010; дата подачи заявки: 11.11.2010; опубликовано: 27.11.2012 Бюл. № 33.
75. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Гладких В. А., Фомин Г. В. Патент РФ на изобретение № 2472974 «Способ защиты газотурбинного двигателя» / Заявка: 2011100598/06, 11.01.2011; дата подачи заявки: 11.01.2011; дата публикации заявки: 20.07.2012 Бюл. № 20; опубликовано: 20.01.2013 Бюл. № 2.
76. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Гладких В. А., Фомин Г. В. Патент РФ на изобретение № 2472957 «Способ управления газотурбинным двигателем» / Заявка: 2010154327/06, 29.12.2010; дата подачи заявки: 29.12.2010; дата публикации заявки: 10.07.2012 Бюл. № 19; опубликовано: 20.01.2013 Бюл. № 2.
77. Титов Ю. К., Дудкин Ю. П., Гладких В. А., Фомин Г. В. Патент РФ на изобретение № 2474713 «Способ защиты газотурбинного двигателя» / Заявка: 2010154324/06, 29.12.2010; дата подачи заявки: 29.12.2010; дата публикации заявки: 10.07.2012 Бюл. № 19; опубликовано: 10.02.2013 Бюл. № 4.
78. Титов Ю.К., Алексеев П.И., Гладких В.А., Дудкин Ю.П., Фомин Г.В., Остапенко С. В., Мельников В. Н., Кононыхин В. М. Патент РФ на изобретение № 2482024 «Способ управления силовой установкой вертолета» / Заявка: 2010154326/11, 29.12.2010; дата подачи заявки: 29.12.2010; опубликовано: 20.05.2013 Бюл. № 14.
79. Титов Ю. К., Гладких В. А., Дудкин Ю. П., Фомин Г.В., Остапенко С.В. Патент РФ на изобретение № 2474712 «Способ управления расходом топлива в газотурбинный двигатель» / Заявка: 2010154325/06, 29.12.2010; дата подачи заявки: 29.12.2010; опубликовано: 10.02.2013 Бюл. № 4.
80. Титов Ю. К., Гладких В. А., Дудкин Ю. П., Фомин Г. В. Патент РФ на изобретение № 2480601 «Способ управления запуском

- газотурбинного двигателя» / Заявка: 2011106704/06, 22.02.2011; дата подачи заявки: 22.02.2011; дата публикации заявки: 27.08.2012 Бюл. № 24; опубликовано: 27.04.2013 Бюл. № 12.
81. Титов Ю. К., Фомин Г. В., Савинова Т. С., Бурдин В. В., // Устройство для управления направляющими аппаратами компрессора газотурбинного двигателя./ А.С. СССР №1501627 от 15.04.1989.
82. 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.
83. Усков А. А. // Системы с нечеткими моделями объектов управления./ монография, Смоленск, Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации", 2013. – 153 с.
84. Усков А. А., Круглов В. В. // Достаточное условие устойчивости замкнутых систем управления с нечеткими логическими регуляторами./ Известия РАН, Теория и системы управления, №4, 2004. – С. 47–51.
85. Усков А. А., Кузьмин А. В. // Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. / М., изд-во: Горячая линия - Телеком, 2004. – 143 с.
86. Усков А. А. // Устойчивость Систем С Блоками Нечеткого Логического Вывода В Объекте Управления. / Российский университет кооперации, М., Управление большими системами, выпуск 39.
87. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Нечеткий и нейронный адаптивные регуляторы возбуждения генератора средней мощности. / Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды 11 Международной конференции (22–24 июня 2009 г), Самара, Россия. – С. 309–312.
88. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Нейро-нечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя./ Приборы, № 5, 2010. – С.17–21.

- 89.Хижняков Ю. Н. // Нечеткое, нейронное и гибридное управление./ учебное пособие, Пермь, изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
- 90.Хижняков Ю. Н. // Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени. / учебное пособие, Пермь, изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 156 с.
- 91.Халов Е. А. // Одномерные многопараметрические функции принадлежности в задачах нечеткого моделирования и управления. / ж-л «Мехатроника, автоматизация, управление» № 4, 2007. – С.2–10.
- 92.Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. // Робастное управление статистического объекта с экстремальной характеристикой в условиях неопределенности./ ж-л «Мехатроника, автоматизация, управление» № 2, 2017. – С. 75–80.
- 93.Цыпкин Я. З., Попков Ю. С. // Теория нелинейных импульсных систем./ М., изд-во: Наука, 1973. – 416 с.
- 94.Шульгин В. А., Гайсинский С. Я. // Двухконтурные турбореактивные двигатели маломощных самолетов./ М., изд-во: Машиностроение, 1984. – 168 с.
- 95.Шляхтенко С. М. // Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей./ учебник для вузов, М., изд-во: Машиностроение, 1987. – 568 с.
- 96.Штовба С. Д. // Проектирование нечетких систем средствами MATLAB./ М., изд-во: Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.
- 97.Abraham A. "Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning", in Nedjah, Nadia & de Macedo Mourelle, Luiza, Fuzzy Systems Engineering: Theory and Practice, vol. 181, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Germany: Springer Verlag, 2005.– С. 53–83
- 98.Jang, J.-S.R. "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 23 (3). 1993. DOI:10.1109/21.256541.

99. Jang, Jyh-Shing R. "Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm" in Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence, Anaheim, CA, USA, July 14–19. 1991. 2: 762–767.
100. Jang, Sun, Mizutani— Neuro-Fuzzy and Soft Computing— Prentice Hall, 1997. pp 335–368, ISBN 0-13-261066-3.
101. Kickert W., Van Nauta Lemke H. //Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant. / Automatica, vol. 12, pp. 301–308. Pergamon Press, 1976.
102. Larsen P.M. // Industrial applications of fuzzy logic control./ International Journal of Man-Machine Studies. Vol. 12, Issue 1, 1980. pp. 3–10.
103. Mamdani E. H. //Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant./ In Proc IEEE, 1974. PP. 121–159.
104. Mamdani E.H., Assilian S. //An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller./ International Journal of Man-Machine Studies, 1975.
105. Mamdani E. H. //Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis./ IEEE Transactions on Computers 26(12), 1977, 1182–1191.
106. Tahmasebi, P. "A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation" (PDF). Computers & Geosciences. 42: 2012. 18–27.
107. Takagi T., Sugeno M. //Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control./ IEEE Trans. On SMC 15, 1985., pp. 116–132. Industrial application of fuzzy logic control.
108. Titov Yu. K., Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A.A. //A way to increase the quality of the control loops of an aircraft engine./ Russian Electrical Engineering, 2013. Vol. 84, №11. P. 622–625. SCOPUS.
109. Titov, Y.K., Khizhnyakov, Y.N., Yuzhakov, A.A., //A Way to Design an Adaptive Fuzzy Controller for the Dispenser Position of an Air-Breathing

Engine./ Russian Electrical Engineering, 2018. Vol. 89(11), C. 621–626.
SCOPUS.

110. Tsukamoto Y. //An approach to fuzzy reasoning method. / North-Holland, Amsterdam, 1979. PP. 137–149.
111. Zadeh L.A. //Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes./ IEEE Trans. Syst. Man Cybern. SMC-1. 1973. PP. 28–44.

Приложения

Математическая модель турбовального двигателя

Модель турбокомпрессора

Газодинамическое ускорение ротора ТК

$$(dn_{\text{ТК}}/dt)_{\text{ПР}} = K_n (G_{\text{Т ПР}} - G_{\text{Т ПР}}^{\text{СТ}}), \quad (\text{A.1})$$

где $G_{\text{Т ПР}}^{\text{СТ}} = f_1(n_{\text{ТК ПР}})$ – статическая характеристика расхода топлива для стандартных условий $t_{\text{ВХ}}^* = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P_{\text{ВХ}}^* = 1,033 \text{ кгс/см}^2$;

$K_n = f_2(n_{\text{ТК ПР}})$ – коэффициент влияния расхода топлива на угловое ускорение ротора турбокомпрессора.

$$dn_{\text{ТК}}/dt = (dn_{\text{ТК}}/dt)_{\text{ПР}} \cdot K_p \quad (\text{A.2})$$

Частота вращения ротора ТК:

$$n_{\text{ТК}} = \int (dn_{\text{ТК}}/dt) \cdot dt, \quad n_{\text{ТК ПР}} = n_{\text{ТК}} / K_t. \quad (\text{A.3})$$

Приведенный избыток топлива:

$$\Delta G_{\text{Т ПР}} = G_{\text{Т ПР}} - G_{\text{Т ПР}}^{\text{СТ}} \quad (\text{A.4})$$

Коэффициенты приведения к атмосферным условиям:

$$K_p = P_{\text{ВХ}}^* / 1,0327; \quad K_t = \sqrt{(t_{\text{ВХ}}^* + 273,15) / (15 + 273,15)}$$

Располагаемая мощность силовой турбины

Изменение располагаемой мощности силовой турбины описывается уравнением:

$$N_{\text{СТ ПР}} = N_{\text{СТ ПР}}^{\text{СТ}} + K_{\text{NE}}^{G_{\text{Т}}} \cdot \Delta G_{\text{Т ПР}}, \quad (\text{A.5})$$

где, $N_{CT\text{ ПР}}^{CT} = f_3(n_{TK\text{ ПР}})$ – статическая характеристика мощности на валу силовой турбины,

$K_{Ne}^{Gt} = f_4(n_{TK\text{ ПР}})$ – коэффициент влияния расхода топлива на мощность силовой турбины.

Физическое значение располагаемой мощности силовой турбины:

$$N_{CT} = N_{CT\text{ ПР}} \cdot K_P \cdot K_t \quad (A.6)$$

Модель нагрузки (воздушного или несущего винта)

Уравнение вращения вала силовой турбины:

$$[J_H \cdot (\pi/30)^2 \cdot (1/75)] \cdot n_{CT} \cdot (dn_{CT}/dt) = N_{CT} - N_B, \quad (A.7)$$

где J_H – момент инерции силовой турбины с учетом приведения к ее ротору вращающихся масс редуктора, винта.

Потребная мощность на валу силовой турбины для $n_{CT} = 100\%$ представляет собой функцию от общего шага несущего винта:

$$N_{B0} = (\varphi - 5,7) \cdot 103,528$$

Для других значений n_{CT} и условий полета потребная мощность рассчитывается по формуле:

$$N_{\epsilon} = \frac{N_{B0} \cdot n_{CT}^3}{1000000} \cdot K_P / (K_t \cdot K_t) \quad (A.8)$$

Частота вращения силовой турбины:

$$n_{CT} = \int (dn_{CT}/dt) \cdot dt \quad (A.9)$$

Математическая модель турбореактивного двухконтурного двигателя

Модель контура частоты вращения ротора КВД

Приведенное ускорение ротора КВД:

$$(dn_{ВД}/dt)_{ПР} = - \frac{\Delta n_{ВД\ ПР}}{\tau_{ВД}} + K_{11} \cdot \Delta G_{Т\ ПР} + K_{12} \cdot \Delta n_{В\ ПР} + K_{13} \cdot G_{Вотб} + K_{14} \cdot \Delta \alpha_{ВНА}, \quad (Б.1)$$

где: $K_{11} = f_1 (n_{ВД\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$K_{12} = f_2 (n_{ВД\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$K_{13} = f_3 (n_{ВД\ ПР}, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$K_{14} = f_4 (n_{ВД\ ПР}, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$\Delta n_{ВД\ ПР} = n_{ВД\ ПР} - n_{ВД\ ПР}^{СТ}; \quad n_{ВД\ ПР}^{СТ} = f (G_{Т\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$$n_{ВД\ ПР} = n_{ВД} / Kt;$$

$\tau_{ВД} = f_5 (n_{ВД\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$$\Delta G_{Т\ ПР} = G_{Т\ ПР} - G_{Т\ ПР}^{СТ};$$

$G_{Т\ ПР}^{СТ} = f (n_{ВД\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$$G_{Т\ ПР} = G_T / (K_p \cdot K_t);$$

$$\Delta n_{В\ ПР} = n_{В\ ПР} - n_{В\ ПР}^{СТ};$$

$n_{В\ ПР}^{СТ} = f (n_{ВД\ ПР}, ВЗ\ СТВ, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$$n_{В\ ПР} = n_{ВД} / Kt;$$

$G_{Вотб} = f (n_{ВД\ ПР}, КПВ\ КВД, ПВ\ ПС);$

$$\Delta \alpha_{ВНА} = \alpha_{ВНА} - \alpha_{ВНА}^{прог}.$$

Физическое значение ускорение ротора КВД:

$$dn_{ВД}/dt = (dn_{ВД}/dt)_{ПР} \cdot K_P \quad (Б.2)$$

Частота вращения ротора КВД:

$$n_{ВД} = \int (dn_{ВД}/dt) \cdot \Delta t \quad (\text{Б.3})$$

Модель контура частоты вращения ротора низкого давления

Собственное ускорение ротора низкого давления:

$$(dn_{В}/dt)_{ПР} = - \frac{\Delta n_{В\text{ ПР}}}{\tau_{В}} + K_{21} \cdot \Delta G_{Т\text{ ПР}} + K_{22} \cdot \Delta n_{ВД\text{ ПР}} + K_{23} \cdot G_{ВОТБ} + K_{24} \cdot \Delta \alpha_{ВНА}, \quad (\text{Б.4})$$

где: $K_{21} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{ВЗ СТВ, КПВ КВД, ПВ ПС});$

$K_{22} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{ВЗ СТВ, КПВ КВД, ПВ ПС});$

$K_{23} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{КПВ КВД, ПВ ПС});$

$K_{24} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{КПВ КВД, ПВ ПС});$

$\tau_{В} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{ВЗ СТВ, КПВ КВД, ПВ ПС});$

$\Delta n_{В\text{ ПР}} = n_{В\text{ ПР}} - n_{ВД\text{ ПР}}^{\text{СТ}}; \quad n_{В\text{ ПР}}^{\text{СТ}}; \quad n_{В\text{ ПР}}^{\text{СТ}} = f(n_{ВД\text{ ПР}}, \text{ВЗ СТВ, КПВ КВД, ПВ ПС});$

$$n_{В\text{ ПР}} = n_{В} / Kt;$$

Физическое значение ускорение ротора низкого давления:

$$dn_{В}/dt = (dn_{В}/dt)_{ПР} \cdot K_{Р} \quad (\text{Б.5})$$

Частота вращения ротора низкого давления:

$$n_{В} = \int (dn_{В}/dt) \cdot \Delta t \quad (\text{Б.6})$$

Модель контура давление воздуха за компрессором высокого давления

1. Давление воздуха за компрессором описывается уравнением:

$$P_{КПР}^* = P_{к пр}^{*ст} + K_{31} \cdot \Delta G_{т пр} + K_{32} \cdot \Delta n_{в пр} + K_{33} \cdot G_{вотб} + K_{34} \cdot \Delta \alpha_{вна}, \quad (Б.7)$$

где: $P_{КПР}^{*ст} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$

$$K_{31} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{32} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{33} = f(n_{ВД пр}, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{34} = f(n_{ВД пр}, КПВ КВД, ПВ ПС).$$

Физическое значение давления воздуха за компрессором:

$$P_K^* = P_{КПР}^* \cdot K_p \quad (Б.8)$$

.

Модель контура температуры газов за ТНД

Температура газов за турбиной низкого давления описывается уравнениями:

$$T_{ТНД пр}^* = T_{тнд пр}^{*ст} + K_{41} \cdot \Delta G_{т пр} + K_{42} \cdot \Delta n_{в пр} + K_{43} \cdot G_{вотб} + K_{44} \cdot \Delta \alpha_{вна}, \quad (Б.9)$$

где: $T_{ТНД пр}^{*ст} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$

$$K_{41} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{42} = f(n_{ВД пр}, ВЗ СтВ, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{43} = f(n_{ВД пр}, КПВ КВД, ПВ ПС);$$

$$K_{44} = f(n_{ВД пр}, КПВ КВД, ПВ ПС).$$

Физическое значение температуры газов за турбиной низкого давления:

$$T_{ТНД}^* = T_{ТНД пр}^* \cdot K_t^2 \quad (Б.10)$$

Математические модели термопар

Математическая модель закрытой термопары, измеряющей температуру газов за турбиной низкого давления описывается системой дифференциальных уравнений, учитывающих прогрев корпуса и спая термопары:

$$\begin{cases} T_{\text{тнд}}^* = T_{\text{сп}} \cdot (\varepsilon_1 \cdot p + 1) \\ T_{\text{тнд}}^* = T_{\text{кор}} \cdot (\varepsilon_2 \cdot p + 1) \\ T_{\text{тнд}}^{\text{изм}} = K \cdot T_{\text{кор}} + T_{\text{сп}} \cdot (1 - K) \end{cases} \quad (\text{Б.11})$$

где:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – постоянные времени точки спая и корпуса соответственно (с);

K – коэффициент, учитывающий теплопроводность от точки спая к точке корпуса.

Постоянная времени ε_1 рассчитывается в зависимости от давления P_K^* .

Постоянная времени ε_2 рассчитывается по формуле $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot 10$.

Коэффициент K принят равным 0,5.

Математическая модель открытой термопары, измеряющей температуру газов за турбиной низкого давления, на запуске описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} T_{\text{тнд}}^* = T_{\text{сп}}^{\text{зап}} \cdot (\varepsilon_1^{\text{зап}} \cdot p + 1) \\ T_{\text{тнд}}^* = T_{\text{кор}}^{\text{зап}} \cdot (\varepsilon_2^{\text{зап}} \cdot p + 1) \\ T_{\text{тнд}}^{\text{зап изм}} = K^{\text{зап}} \cdot T_{\text{кор}}^{\text{зап}} + T_{\text{сп}}^{\text{зап}} \cdot (1 - K^{\text{зап}}) \end{cases} \quad (\text{Б.12})$$

Постоянные времени $\varepsilon_1^{\text{зап}}$ и $\varepsilon_2^{\text{зап}}$ рассчитываются в зависимости от приведенной частоты вращения ротора КВД.

Постоянная времени $\varepsilon_2^{\text{зап}}$ рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_2^{\text{зап}} = \varepsilon_1^{\text{зап}} \cdot 10.$$

Коэффициент $K^{\text{зап}}$ принят равным 0,3.

Приведение параметров двигателя к высотным условиям

Параметры двигателя приводятся по параметрам полета по стандартным формулам приведения:

$$P_{\text{вх}}^* = P_{\text{н}} \cdot (1 + 0.2 \cdot M^2)^{3.5};$$

$$T_{\text{вх}}^* = T_{\text{нк}} \cdot (1 + 0.2 \cdot M^2);$$

$$M = V_{\text{н}} / V_{\text{зв}}; \quad T_{\text{нк}} = T_{\text{н}} + 273.15 \text{ К}^{\circ},$$

где:

M – мах полета;

$V_{\text{н}}$ – скорость полета, км/час;

$V_{\text{зв}} = 3.6 \cdot 20.05 \cdot \sqrt{T_{\text{нк}}}$ – скорость звука, км/час;

$P_{\text{вх}}^*, t_{\text{вх}}^*$ – давление и температура воздуха по МСА.

$$K_p = P_{\text{вх}}^* / 1.033; \quad K_t = \sqrt{T_{\text{вх}}^* / 288.15}; \quad n_{\text{вд пр}} = n_{\text{вд}} \sqrt{\frac{288.15}{T_{\text{вх}}^*}} = n_{\text{вд}} / K_t;$$

$$n_{\text{в пр}} = n_{\text{в}} \sqrt{\frac{288.15}{T_{\text{вх}}^*}} = n_{\text{в}} / K_t; \quad P_{\text{к пр}}^* = P_{\text{к}}^* \cdot \frac{1.033}{P_{\text{вх}}^*} = P_{\text{к}}^* / K_p;$$

$$T_{\text{тц пр}}^* = T_{\text{тц}}^* \cdot \frac{288.15}{T_{\text{вх}}^*} = T_{\text{тц}}^* / K_t^2;$$

$$G_{\text{т пр}} = G_{\text{т}} \cdot \frac{1.033}{P_{\text{вх}}^*} \cdot \sqrt{\frac{288.15}{T_{\text{вх}}^*}} = G_{\text{т}} \cdot (K_p \cdot K_t);$$

$$(dn_{\text{вд}}/dt)_{\text{пр}} = (dn_{\text{вд}}/dt) \cdot (1.033/P_{\text{вх}}^*) = (dn_{\text{вд}}/dt) / K_p;$$

$$(dn_{\text{в}}/dt)_{\text{пр}} = (dn_{\text{в}}/dt) \cdot (1.033/P_{\text{вх}}^*) = (dn_{\text{в}}/dt) / K_p$$

Для режима, соответствующего высоте $H = 0$ километров:

$$T_{\text{н}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}, P_{\text{н}} = 1,033 \text{ кг/см}^2, V_{\text{н}} = 0 \text{ км/час}, M = 0.$$

Ускорение КВД, обеспечиваемое воздушным стартером

$$(dn_{\text{вд}}^{\text{СТАР}}/dt) = \frac{M_{\text{вс}} \cdot 30}{J_{\text{вд}} \cdot \pi},$$

где: $M_{\text{вс}}$ – крутящий момент развиваемый воздушным стартером задается в функции $n_{\text{вд}}$.

$J_{\text{вд}}$ – момент инерции ротора КВД.

Формирование сигнала на открытие или закрытие заслонки воздушного стартера (СтВ) происходит следующим образом:

1) сигнал «Открытие заслонки СтВ» =1,

суммарное ускорение ротора КВД на данном участке запуска:

$$(dn_{\text{КВД}}/dt)=(dn_{\text{ВД}}^{\text{СТАР}}/dt)+(dn_{\text{ВД}}/dt);$$

2) сигнал «Закрытие заслонки СтВ» =0,

Ускорение ротора КВД на данных режимах:

$$(dn_{\text{КВД}}/dt)=(dn_{\text{ВД}}/dt).$$

По сигналу «Закрытие заслонки СтВ», выдаваемому электронным регулятором, производится переключение всех статических характеристик и коэффициентов ММ с одной характеристики на другую.

Приложение В

Математическое описание гидромеханической части дозатора

Введем условные обозначения:

$P_{кпд}$ – давление топлива, вырабатываемое клапаном постоянного давления над сливом, кгс/см²;

P_k – командное давление топлива в управляющей полости гидроцилиндра, кгс/см²;

$P_{к1}$ ($P_{к2}$) – давление топлива в правой (левой) управляющей полости усиленного золотника соответственно, кгс/см²;

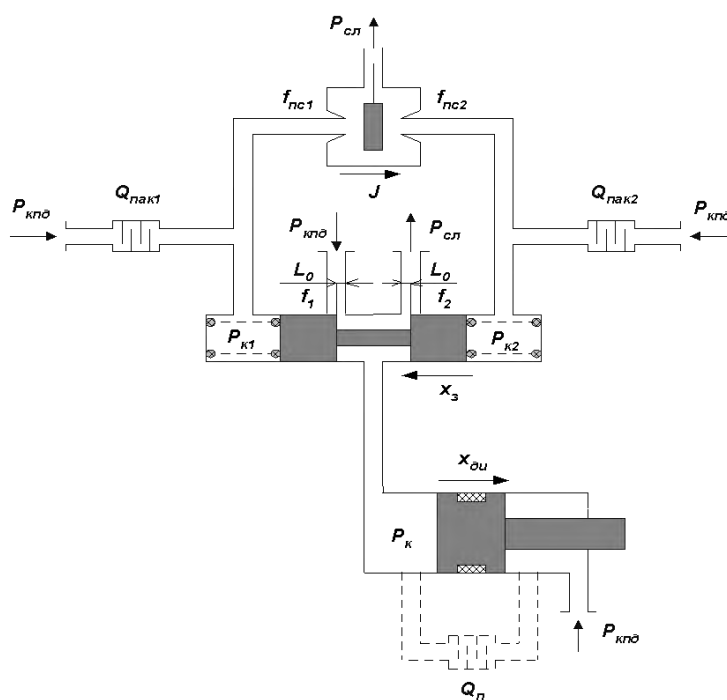


Рис. В1. Принципиальная схема гидромеханической части дозатора: $P_{кпд}$ – давление топлива, вырабатываемое клапаном постоянного давления над сливом, кгс/см²; $P_{к1}$ ($P_{к2}$) – давление топлива в правой (левой) управляющей полости золотника соответственно, кгс/см²; $P_{сл}$ – давление топлива слива, кгс/см²; f_1 , f_2 – наполняющие и сливные отверстия во втулке золотника, мм²; $f_{пс1}$, $f_{пс2}$ – эквивалентные площади отверстий ПС-7, мм²; L_0 – начальное открытие пазов во втулке при положении золотника $x_з = 0$ мм, мм; $x_{ди}$ – ход дозирующего крана, мм; $x_з$ – ход управляющего золотника, мм; $Q_{пак1}$, $Q_{пак2}$ – проливка дроссельных пакетов, см³/мин

$P_{\text{сл}}$ – давление топлива слива, кгс/см²;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения, кгс;

J_{GT} – управляющий ток, выдаваемый на ПС-7, мА;

$F_{\text{п}} (F_{\text{шт}})$ – торцевая площадь поршня (штока) гидроцилиндра, см²;

F_3 – торцевая площадь золотника, см²;

f_1, f_2 – наполняющие и сливные отверстия во втулке золотника, мм²;

$f_{\text{пс1}}, f_{\text{пс2}}$ – эквивалентные площади отверстий ПС-7, мм²;

b – ширина пазов во втулке чувствительного золотника, мм;

L_0 – начальное открытие пазов во втулке при положении золотника

$x_3 = 0$ мм;

$x_{\text{ди}}$ – ход дозирующего крана, мм;

x_3 – ход управляющего золотника, мм;

C_3 – суммарная жесткость пружины, кгс/мм;

$P_{\text{пр0}}$ – сила начальной затяжки пружины, кгс;

$Q_{\text{пак1}}, Q_{\text{пак2}}$ – проливка дроссельных пакетов, см³/мин;

g – ускорение свободного падения, см/с²;

γ – плотность топлива, кг/см³;

μ – динамическая вязкость топлива, (кг•с)/см²;

q_1, q_2 – утечки топлива через пазы золотника, см³/с;

s – диаметральный зазор между втулкой золотника и самим золотником, см;

$\alpha_{\text{ди}}$ – положение дозирующего крана иглы по датчику ДБСКТ, град;

K_α – коэффициент перехода от $x_{\text{ди}}$ к $\alpha_{\text{ди}}$, град/мм;

Q – расход топлива, см³/с;

l – длина перекрытия, мм;

Δt – шаг интегрирования, с

Тогда уравнение равенства сил на золотнике:

$$P_{\kappa 2} F_3 = P_{\text{пр0}} + C_3 x_3 + P_{\kappa 1} F_3. \quad (\text{B1})$$

и уравнение равенства сил на гидроцилиндре:

$$P_{\kappa} F_n = P_{\text{кпл}} (F_n - F_{\text{шт}}) + P_{\text{сл}} F_{\text{шт}} + F_{\text{тр}} \text{sign} (\dot{x}_{\text{ду}}) . \quad (\text{B2})$$

Запишем уравнение баланса расходов топлива в правую управляющую полость золотника:

$$A f_{\text{ис2}} \sqrt{P_{\kappa 2} - P_{\text{сл}}} + \frac{F_3}{10} \frac{dx_3}{dt} = Q_{\text{п2}} \sqrt{P_{\text{кпл}} - P_{\kappa 2}} . \quad (\text{B3})$$

и уравнение баланса расходов топлива в левую управляющую полость золотника:

$$A f_{\text{ис1}} \sqrt{P_{\kappa 1} - P_{\text{сл}}} - \frac{F_3}{10} \frac{dx_3}{dt} = Q_{\text{п1}} \sqrt{P_{\text{кпл}} - P_{\kappa 1}} . \quad (\text{B4})$$

Уравнение баланса расходов топлива в полости гидроцилиндра:

$$A f_1 \sqrt{P_{\text{кпл}} - P_{\kappa}} + q_1 = \frac{F_{\text{п}}}{10} \frac{dx_{\text{дн}}}{dt} + A f_2 \sqrt{P_{\kappa} - P_{\text{сл}}} + q_2 , \quad (\text{B5})$$

где: q_1 и q_2 – утечки топлива через пазы золотника вычисляются по следующим формулам:

$$q_1 = \begin{cases} \frac{2 \cdot 0,1 b s^3 (P_{\text{кпл}} - P_{\kappa})}{12 \mu 0,1 (-l_0 - x_3) \cdot 8} , & -x_{3 \text{ max}} < x_3 \leq -l_0 - l_{\text{гр1}} , \\ A^* \cdot 0,1 b s \sqrt{P_{\text{кпл}} - P_{\kappa}} , & -l_0 - l_{\text{гр1}} < x_3 \leq x_{3 \text{ max}} \end{cases} ,$$

$$q_2 = \begin{cases} A^* \cdot 0,1 b s \sqrt{P_{\kappa} - P_{\text{сл}}} , & -x_{3 \text{ max}} < x_3 \leq l_0 + l_{\text{гр2}} , \\ \frac{2 \cdot 0,1 b s^3 (P_{\kappa} - P_{\text{сл}})}{12 \mu 0,1 (l_0 - x_3) \cdot 8} , & l_0 + l_{\text{гр2}} < x_3 \leq x_{3 \text{ max}} \end{cases} ,$$

где: $l_{\text{гр1}} = 10 \cdot \frac{s^2 \sqrt{P_{\text{кпл}} - P_{\kappa}}}{A^* \cdot 48 \mu} \text{ мм}, \quad l_{\text{гр2}} = 10 \cdot \frac{s^2 \sqrt{P_{\kappa} - P_{\text{сл}}}}{A^* \cdot 48 \mu} \text{ мм}.$

Ход гидроцилиндра:

$$x_{\text{ду} i} = x_{\text{ду} i-1} + (\dot{x}_{\text{ду}})_i \Delta t , \quad (\text{B6})$$

Максимальное перемещение гидроцилиндра:

$$0 \leq x_{\text{ду}} \leq x_{\text{ду max}} .$$

Ход золотника:

$$x_{zi} = x_{zi-1} + (\dot{x}_z)_i \Delta t . \quad (B7)$$

Максимальное перемещение золотника:

$$|x_z| \leq x_{z \max} .$$

Открытие пазов во втулке управляющего золотника:

$$f_1 = \begin{cases} 0 & , \quad -x_{z \max} < x_z \leq -l_0 \\ 2b(l_0 + x_z), & -l_0 < x_z \leq x_{z \max} \end{cases}, \quad f_2 = \begin{cases} 2b(l_0 - x_z), & -x_{z \max} < x_z \leq l_0 \\ 0 & , \quad l_0 < x_z \leq x_{z \max} \end{cases} \quad (B8)$$

Приняты следующие параметры ПС-7:

- диаметр сопла $0,5^{+0,1}$ мм;
- зазор между заслонкой и соплом 0,08 мм;
- ход заслонки при максимальном токе ($J_{GT} = \pm 35$ мА) $\pm 0,073$ мм.

Площади сливных отверстий сопел от величины управляющего тока:

$$f_{nc1} = f_{nc1}(J_{GT}), \quad f_{nc2} = f_{nc2}(J_{GT}) \quad (B9)$$

Зависимость площади сливных отверстий сопел от величины управляющего тока представлена в табл. В2. и рис.В2.

Таблица В2

J_{GT}	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
f_{nc1}	0,048	0,058	0,069	0,076	0,086	0,096	0,105
f_{nc2}	0,15	0,146	0,141	0,136	0,133	0,126	0,121

0	5	10	15	20	25	30	35
0,114	0,121	0,128	0,134	0,141	0,148	0,154	0,158
0,115	0,108	0,101	0,093	0,084	0,075	0,067	0,057

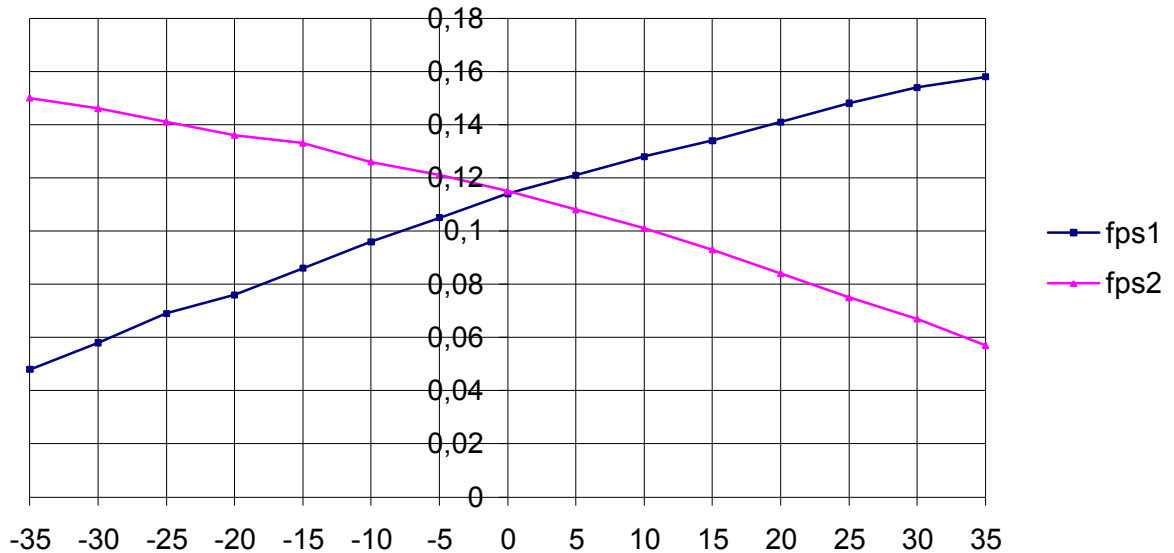


Рис. В2. График зависимости площади сливных отверстий от величины управляющего тока

Учитывая, что функции (В9) практически линейные введем следующие линейные функции

$$f_{nc1} = 0,106 + tg \ 0,007; \ f_{nc2} = 0,106 - tg \ 0,007 \ . \quad (B10)$$

Линейность данных функций позволяет сделать заключение о линейности дозатора.

Вывод передаточной функции дозатора без обратной связи

Линеаризуем систему уравнений (В1) – (В5), (В8), (В9) вблизи статического режима.

Равенство сил, действующих на чувствительный золотник на статическом режиме

$$P_{\kappa 2}^0 F_z = P_{np0} + C_z x_{z0} + P_{\kappa 1}^0 F_z, \quad (B11)$$

Линеаризуем уравнение (В1) в районе статического режима

$$(P_{\kappa 2}^0 + \Delta P_{\kappa 2}) F_z = P_{np0} + C_z (x_{z0} + \Delta x_z) + (P_{\kappa 1}^0 + \Delta P_{\kappa 1}) F_z. \quad (B12)$$

Вычитая из уравнения (В11) уравнение (В12), получим

$$\Delta P_{\kappa 2} F_z = C_z \Delta x_z + \Delta P_{\kappa 1} F_z. \quad (B13)$$

Так как давление топлива клапана постоянного давления ($P_{кпд}$) и давление слива ($P_{сл}$) в динамике не изменяются, то из равенства сил на гидроцилиндре можно получить следующее линеаризованное уравнение (2.15) вблизи статического режима

$$(P_{\kappa}^0 + \Delta P_{\kappa})F_n = P_{кпд} (F_n - F_{шт}) + P_{сл} F_{шт} + F_{мп} \text{sign} (\dot{x}_{ду}) .$$

Вычтем из него уравнение (B2) и получим

$$\Delta P_{\kappa} = 0 \quad (B14)$$

Функции площадей сливных отверстий ПС-7 $f_{пс1}$, $f_{пс2}$, линеаризованные вблизи статического режима, имеют следующий вид

$$f_{пс1} = f_{пс1}^0 + \Delta f_{пс1} , \quad \Delta f_{пс1} = K_{пс1} \Delta J_{GT}$$

$$f_{пс2} = f_{пс2}^0 + \Delta f_{пс2} , \quad \Delta f_{пс2} = K_{пс2} \Delta J_{GT}$$

где

$$K_{пс1} = \frac{\partial f_{пс1}}{\partial J_{GT}} \geq 0 , \quad K_{пс2} = \frac{\partial f_{пс2}}{\partial J_{GT}} \leq 0$$

определяются по характеристикам табл. 1.

Баланс расходов топлива в правую управляющую полость золотника на статическом режиме

$$A f_{пс2}^0 \sqrt{P_{\kappa2}^0 - P_{сл}} = Q_{п2} \sqrt{P_{кпд} - P_{\kappa2}^0} , \quad (B15)$$

Линеаризуем уравнение (B3) в точке

$$A (f_{пс2}^0 + K_{пс2} \Delta J_{GT}) \sqrt{(P_{\kappa2}^0 + \Delta P_{\kappa2}) - P_{сл}} + \frac{F_3}{10} \frac{d(x_3^0 + \Delta x_3)}{dt} = Q_{п2} \sqrt{P_{кпд} - (P_{\kappa2}^0 + \Delta P_{\kappa2})} .$$

Преобразовав это уравнение и вычтя из него уравнение (B14), получаем

$$\left(\frac{A f_{пс2}^0}{2 \sqrt{P_{\kappa2}^0 - P_{сл}}} + \frac{Q_{п2}}{2 \sqrt{P_{кпд} - P_{\kappa2}^0}} \right) \Delta P_{\kappa2} + A K_{пс2} \sqrt{P_{\kappa2}^0 - P_{сл}} \Delta J_{GT} + \frac{F_3}{10} p \Delta x_3 = 0 . \quad (B16)$$

Проделав аналогичные выкладки с уравнением баланса расхода топлива в левую управляющую полость золотника (B4), получим следующее уравнение

$$\left(\frac{A f_{пс1}^0}{2 \sqrt{P_{\kappa1}^0 - P_{сл}}} + \frac{Q_{п1}}{2 \sqrt{P_{кпд} - P_{\kappa1}^0}} \right) \Delta P_{\kappa1} + A K_{пс1} \sqrt{P_{\kappa1}^0 - P_{сл}} \Delta J_{GT} - \frac{F_3}{10} p \Delta x_3 = 0 . \quad (B17)$$

Линеаризуем функции открытия пазов во втулке управляющего золотника в районе статического режима

$$\begin{aligned} f_1 &= f_1^0 + \Delta f_1, & \Delta f_1 &= 2b \Delta x_3, \\ f_2 &= f_2^0 + \Delta f_2, & \Delta f_2 &= -2b \Delta x_3. \end{aligned}$$

При линеаризации уравнения (B5) утечками через золотник пренебрегаем. Баланс расходов топлива в полости гидроцилиндра на статическом режиме

$$A f_1^0 \sqrt{P_{кно} - P_{\kappa}^0} = A f_2^0 \sqrt{P_{\kappa}^0 - P_{сг}}. \quad (B18)$$

Линеаризуем (B5) вблизи статического режима

$$A (f_1^0 + 2b \Delta x_3) \sqrt{P_{кно} - (P_{\kappa}^0 + \Delta P_{\kappa})} = \frac{F_n}{10} \frac{d(x_{ду}^0 + \Delta x_{ду})}{dt} + A (f_2^0 - 2b \Delta x_3) \sqrt{(P_{\kappa}^0 + \Delta P_{\kappa}) - P_{сг}} \quad (B19)$$

Учитывая уравнение (B13), вычитаем из уравнения (B19) уравнение (B18) и получаем

$$A 2b (\sqrt{P_{кно} - P_{\kappa}^0} + \sqrt{P_{\kappa}^0 - P_{сг}}) \Delta x_3 = \frac{F_n}{10} p \Delta x_{ду} \quad (B20)$$

Таким образом, получили следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} F_3 \Delta P_{\kappa 2} &= C_3 \Delta x_3 + F_3 \Delta P_{\kappa 1}, \\ A_1 \Delta P_{\kappa 1} + A_2 \Delta J_{GT} + \frac{F_3}{10} p \Delta x_3 &= 0, \\ B_1 \Delta P_{\kappa 1} + B_2 \Delta J_{GT} - \frac{F_3}{10} p \Delta x_3 &= 0 \\ C_1 \Delta x_3 &= \frac{F_n}{10} p \Delta x_{ду}, \end{aligned} \quad (B21)$$

где:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{A f_{нс 2}^0}{2 \sqrt{P_{\kappa 2}^0 - P_{сг}}} + \frac{Q_{n 2}}{2 \sqrt{P_{кно} - P_{\kappa 2}^0}}, & A_2 &= A K_{нс 2} \sqrt{P_{\kappa 2}^0 - P_{сг}}, \\ B_1 &= \frac{A f_{нс 1}^0}{2 \sqrt{P_{\kappa 1}^0 - P_{сг}}} + \frac{Q_{n 1}}{2 \sqrt{P_{кно} - P_{\kappa 1}^0}}, & B_2 &= A K_{нс 1} \sqrt{P_{\kappa 1}^0 - P_{сг}}, \\ C_1 &= A 2b (\sqrt{P_{кно} - P_{\kappa}^0} + \sqrt{P_{\kappa}^0 - P_{сг}}). \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (B21), получаем:

$$\begin{aligned} (T_3 p + 1) \Delta x_3 &= K_3 \Delta J_{GT}, \\ p \Delta x_{ду} &= K_x \Delta x_3, \end{aligned}$$

где:

$$T_z = \frac{F_z^2}{10 C_z} \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{A_1} \right), \quad K_z = \frac{F_z}{C_z} \left(\frac{B_2}{B_1} - \frac{A_2}{A_1} \right), \quad K_x = \frac{10 C_1}{F_n}.$$

Приложение Г

Переходные процессы работы адаптивного нечеткого регулятора при снижении режима работы двигателя

Переходные процессы работы адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора с дозирующим устройством, охваченным обратной связью.

На рис. Г1....рис. Г6 приведены осциллограммы изменения параметров двухвального ТРДД при изменении режима работы двигателя переводом РУД – изменение $\alpha_{\text{РУД}}$ со значения $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{ВЗЛЕТ}}$ на значение $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{МГ}}$ на земле ($H=0\text{км}$).

На рис. Г1 показано изменение положения рычага управления двигателем.

На рис. Г2 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора вентилятора.

На рис. Г3 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора КВД.

На рис. Г4 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения ускорения частоты вращения ротора КВД.

На рис. Г5 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения расхода топлива.

На рис. Г6 приведена осциллограмма изменения метки селектора контуров управления.

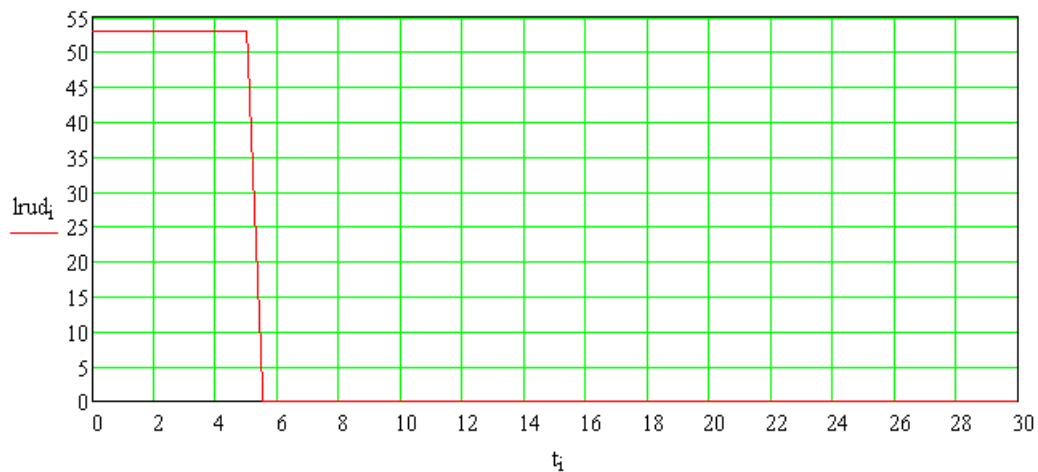


Рис.Г1. Изменение положения рычага управления двигателем.

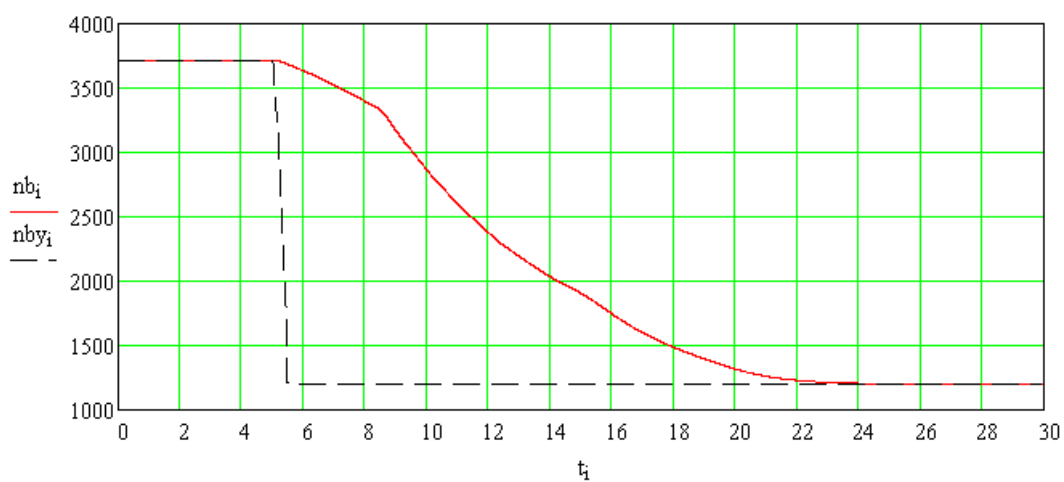


Рис.Г2. Программное и текущее значение частоты вращения ротора вентилятора.

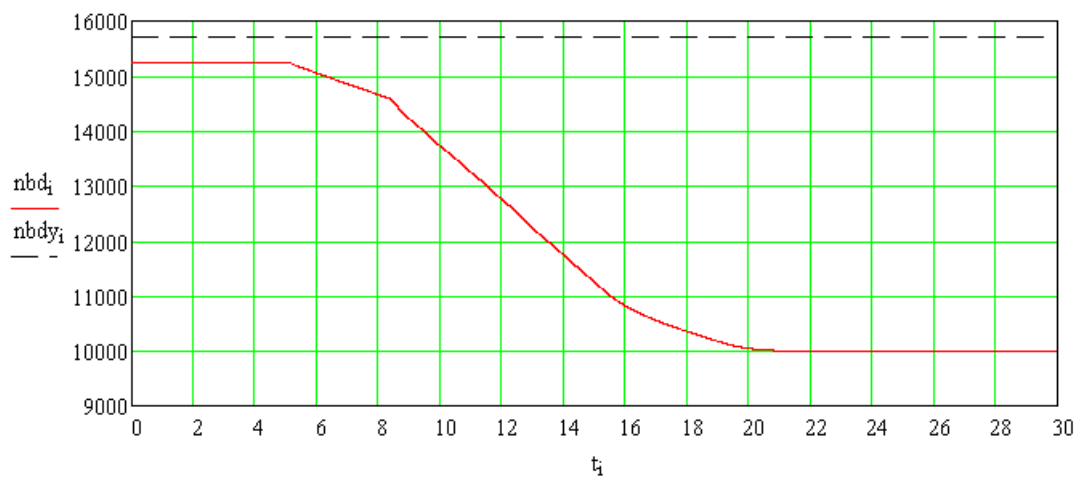


Рис.Г3. Программное и текущее значение частоты вращения ротора КВД.

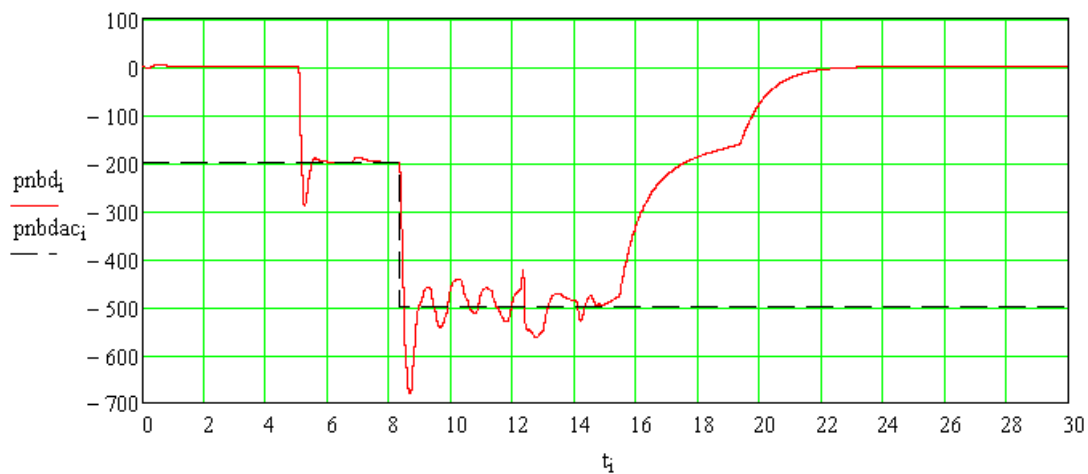


Рис.Г4. Программное и текущее значение ускорения частоты вращения ротора КВД.

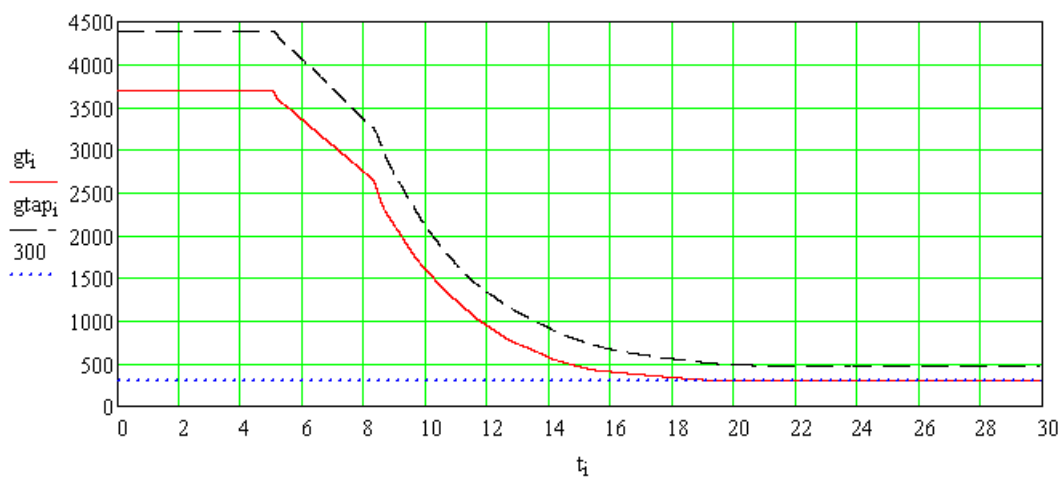


Рис.Г5. Программное и текущее значение расхода топлива двигателя.

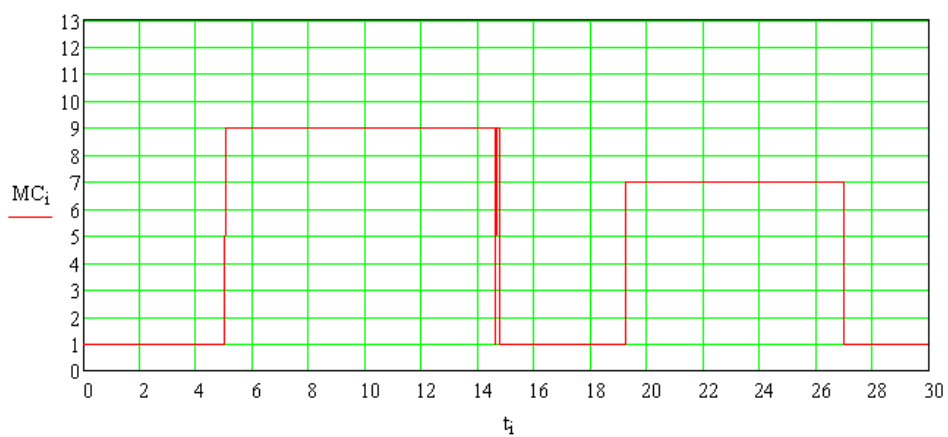


Рис.Г6. Метки селектора

Переходные процессы работы адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора с дозирующим устройством, не охваченным обратной связью.

На рис. Г7.... рис. Г13 приведены осциллограммы изменения параметров двухвального ТРДД при изменении режима работы двигателя переводом РУД – изменение $\alpha_{\text{РУД}}$ со значения $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{ВЗЛЕТ}}$ на значение $\alpha_{\text{РУД}}^{\text{МГ}}$ на земле ($H=0\text{км}$).

На рис. Г7 показано изменение положения рычага управления двигателем.

На рис. Г8 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора вентилятора.

На рис. Г9 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения частоты вращения ротора КВД.

На рис. Г10 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения ускорения частоты вращения ротора КВД.

На рис. Г11 приведена осциллограмма изменения программного и текущего значения расхода топлива.

На рис. Г12 приведена осциллограмма изменения метки селектора контуров управления.

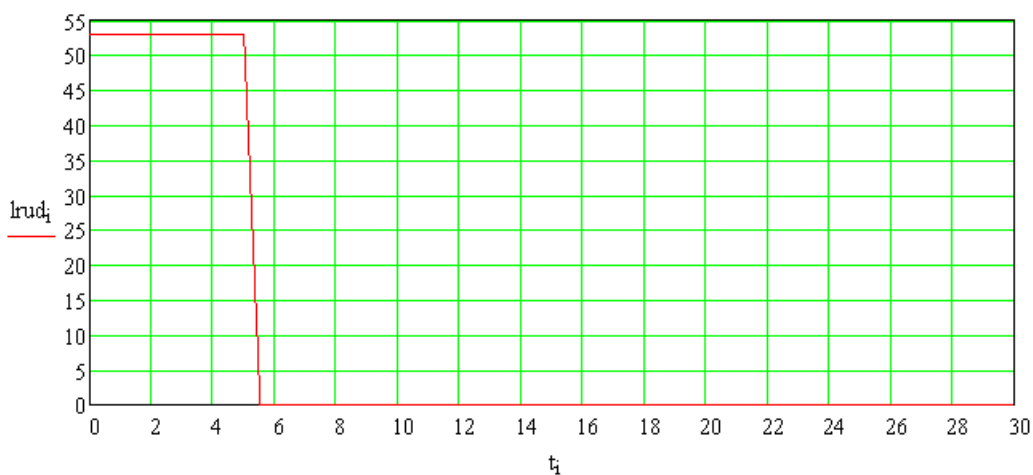


Рис.Г7. Изменение положения рычага управления двигателем

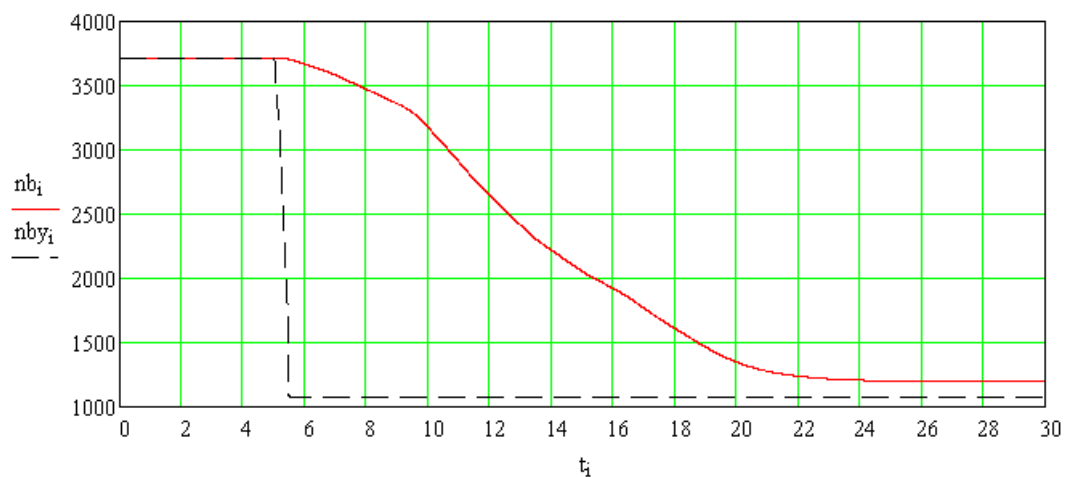


Рис.Г8. Программное и текущее значение частоты вращения ротора вентилятора

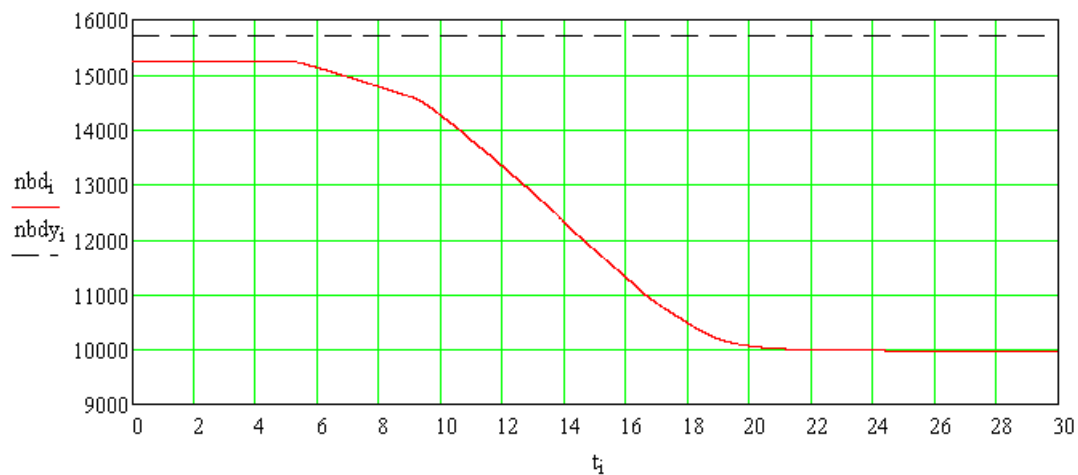


Рис. Г9. Программное и текущее значение частоты вращения ротора КВД



Рис. Г10. Программное и текущее значение ускорения частоты вращения ротора КВД

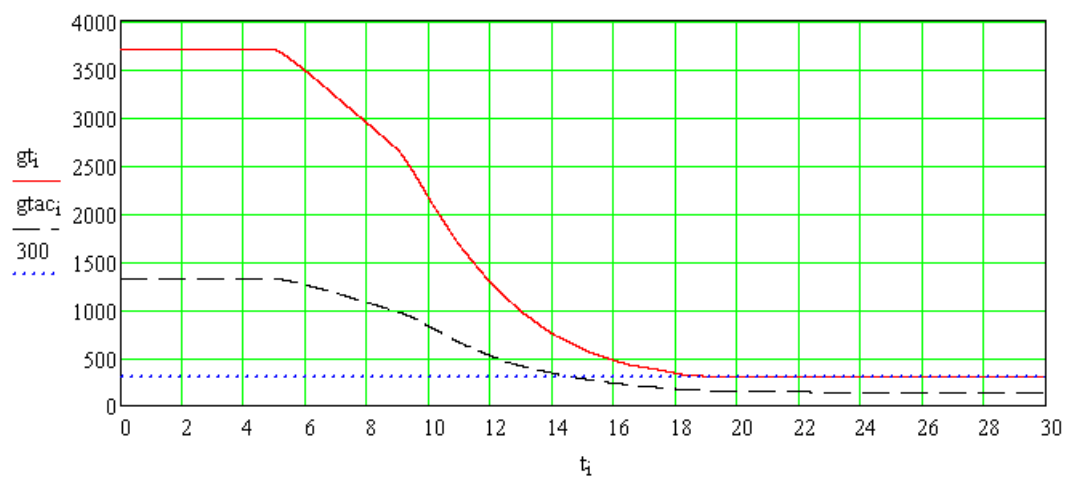


Рис. Г11. Программное и текущее значение расхода топлива двигателя

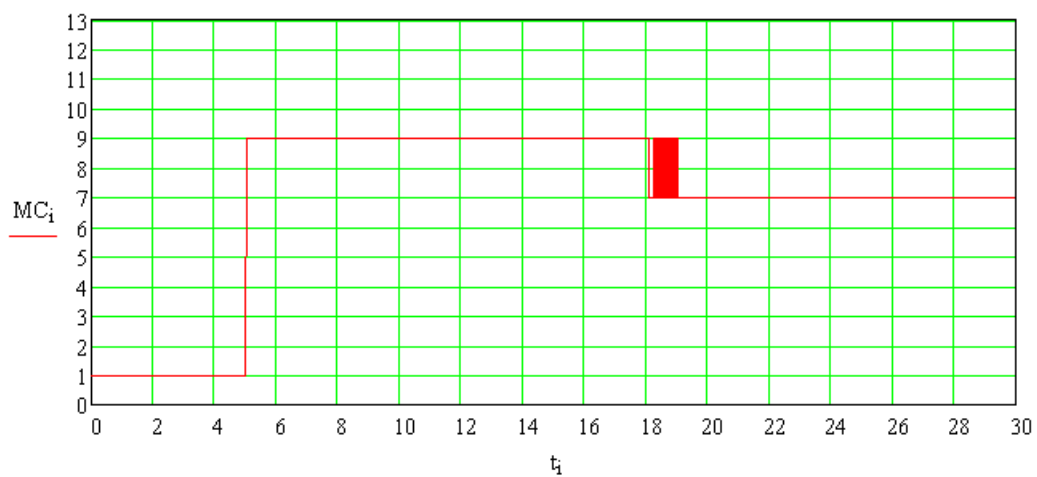


Рис.Г12. Метки селектора

Анализ адаптивности адаптивного нечеткого регулятора

Анализ адаптивных свойств нейро-нечеткого регулятора выполнен путем проверки работы регулятора с объектом управления, характеризующимся некорректным математическим описанием.

В данном приложении приведен анализ адаптивности адаптивного нечеткого регулятор управления частотой вращения ротора вентилятора ТРДД.

Некорректное математическое описание объекта управления имитировалось изменением статической характеристике двигателя по расходу топлива двигателя. При изменении наклона статической характеристики двигателя изменяется коэффициент усиления двигателя, как объекта управления.

Измененная статическая характеристика двигателя по расходу топлива двигателя приведена на рис. Д1 (синяя пунктирная линия).



Рис. Д1. Статические характеристики двигателя по расходу топлива

На рис.Д2...Д4 представлены графики переходных процессов при работе системы на контуре управления частотой вращения ротора вентилятора. Красной линией прорисованы параметры, полученные с исходной статической характеристикой в математическом описании объекта управления. Синей пунктирной линией с измененной статической характеристикой. Возмущение типа «скачек» подавалось путем мгновенного увеличения программного значения n_e^{yct} . Как видно из рис.Д4, при одних и тех же значениях частоты вращения ротора КВД (рис. Д3), соответствующие величины расхода топлива различные (1000 и 1800).

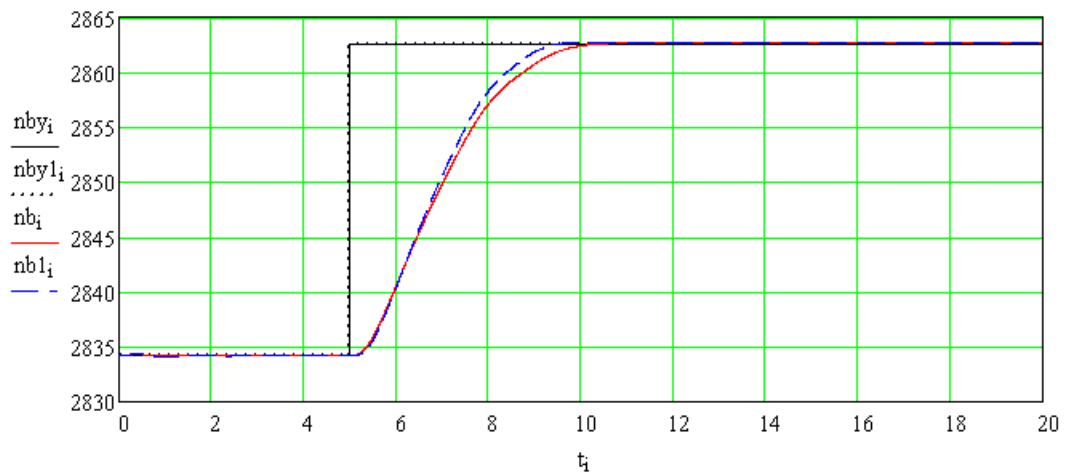


Рис.Д2. Изменение частоты вращения ротора вентилятора при корректном и некорректном математическом описании объекта.

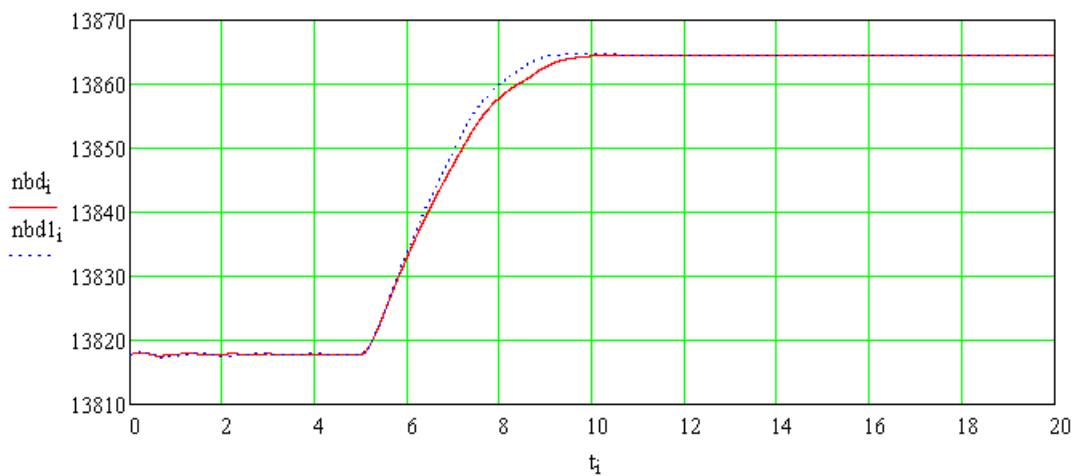


Рис.Д3. Изменение частоты вращения ротора КВД при корректном и некорректном математическом описании объекта

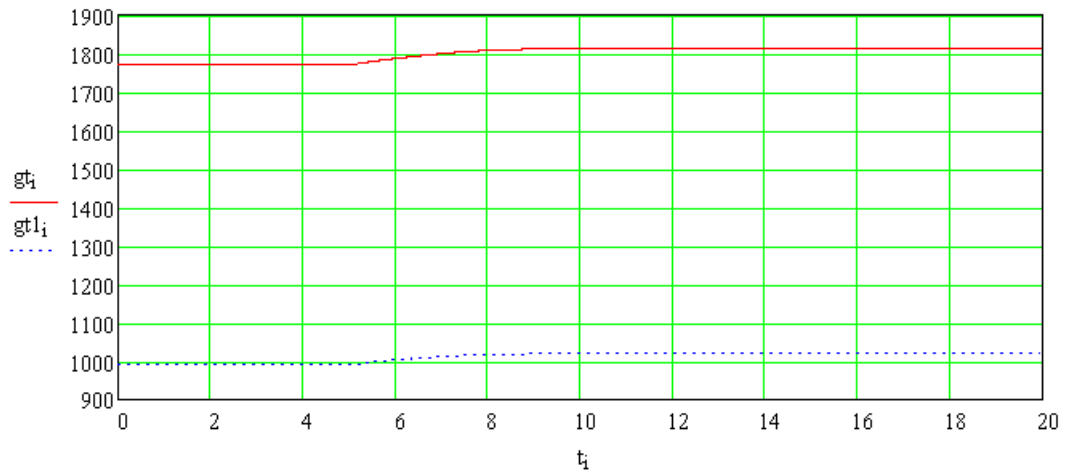
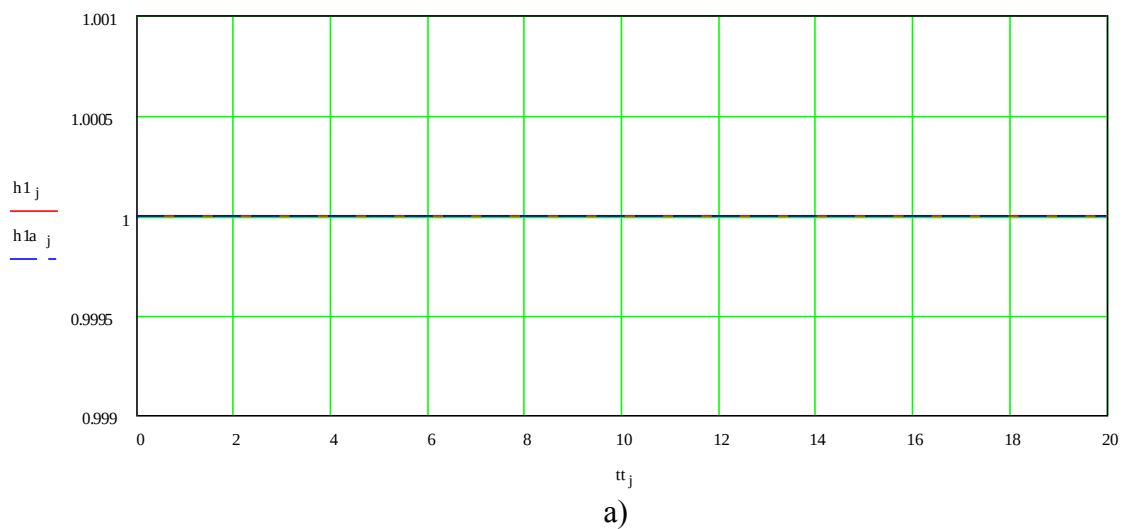
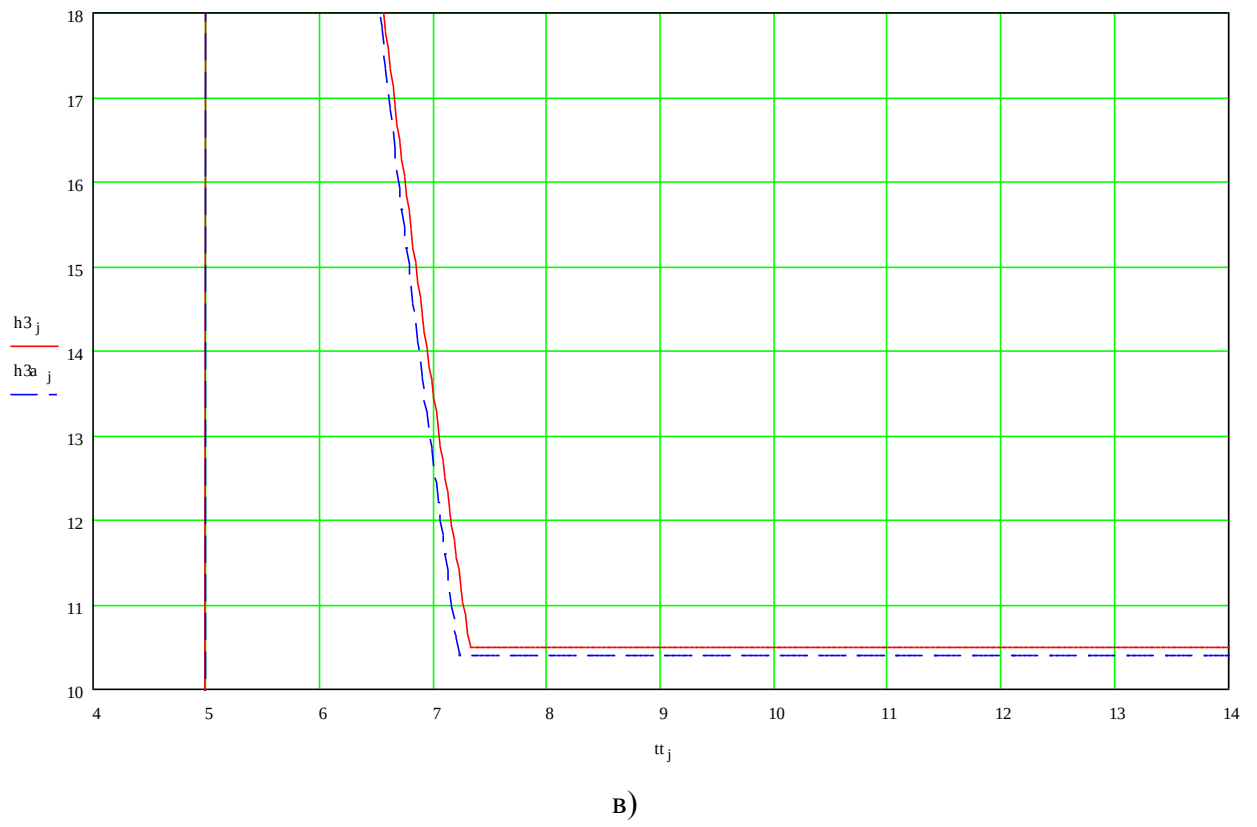
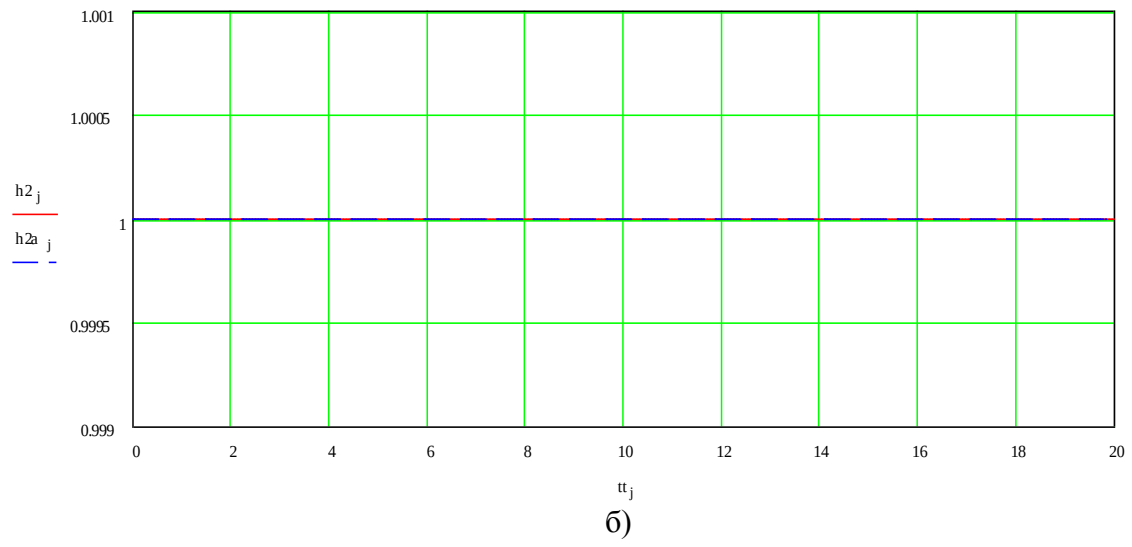


Рис.Д4. Изменение расхода топлива двигателя. при корректном и некорректном математическом описании объекта

Ниже, на рис. Д5 приведены графики изменения синапсов h_i адаптивно-нечеткого регулятора для систем с исходной (красная сплошная линия) и измененной (синяя пунктирная линия) статикой (рис. Д1). Из графиков видно, что при подаче скачкообразного возмущения путем мгновенного увеличения программного значения $n_e^{yc T}$ работают только синапсы h_3 и h_4 . Некорректное математическое описание объекта регулирования приводит к небольшому изменению в величине работающих синапсов.





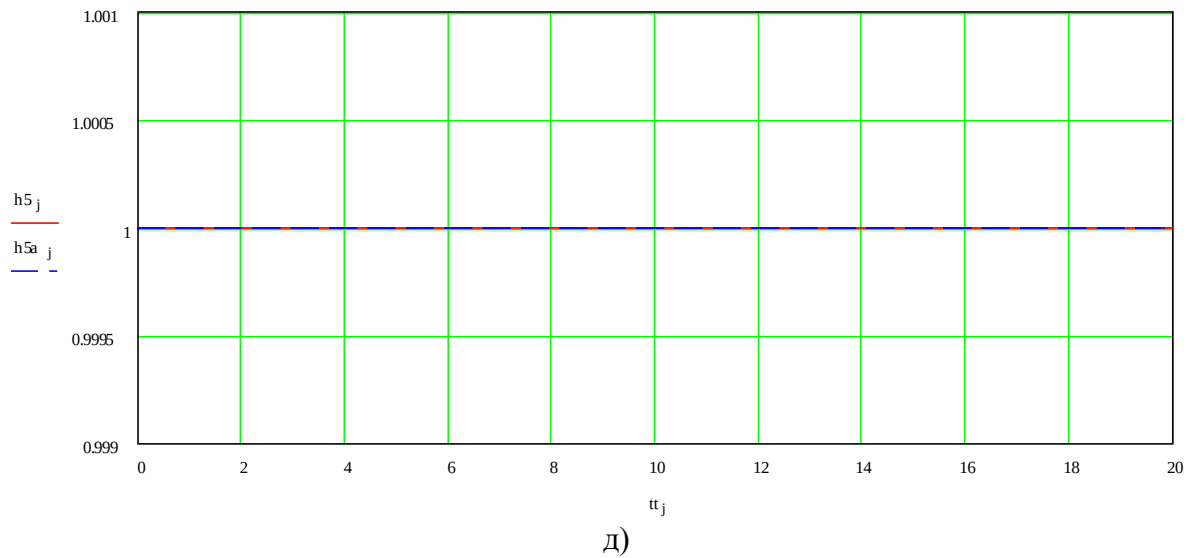
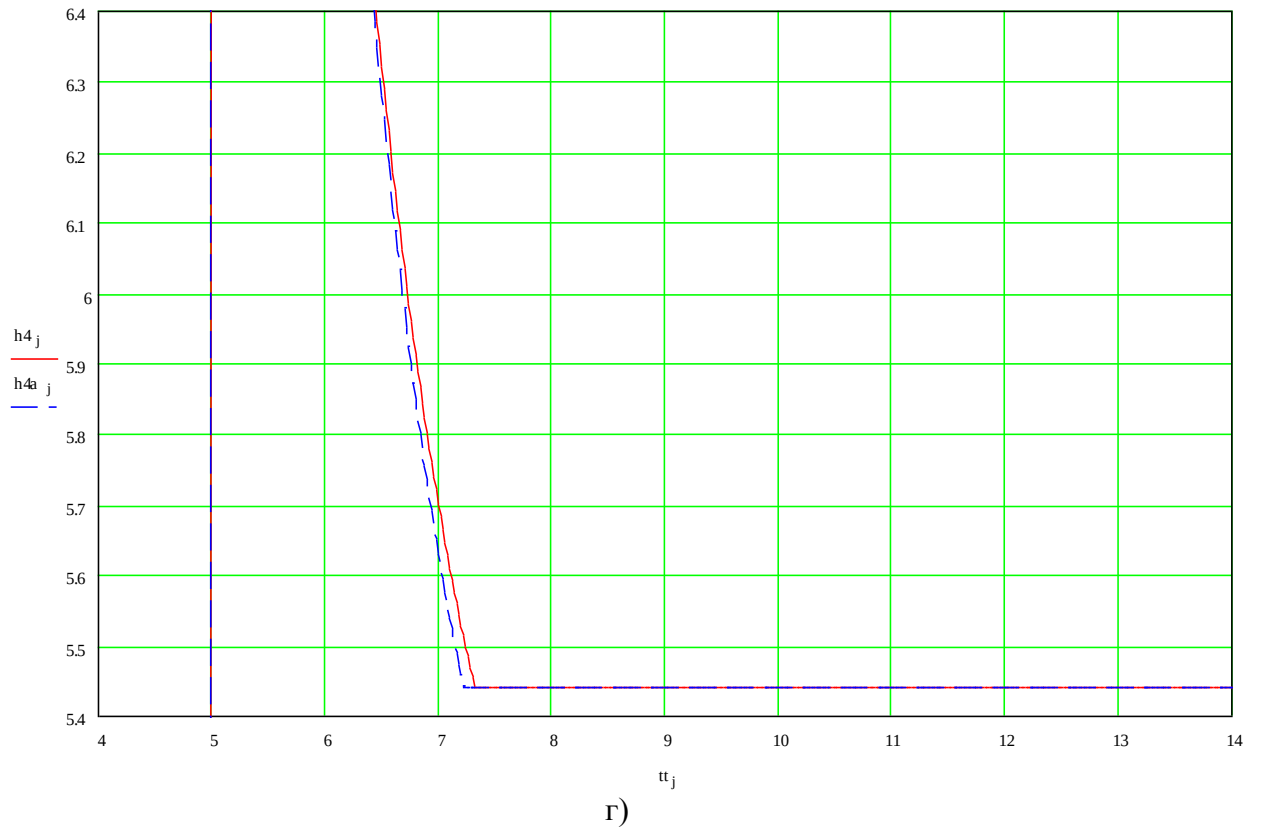
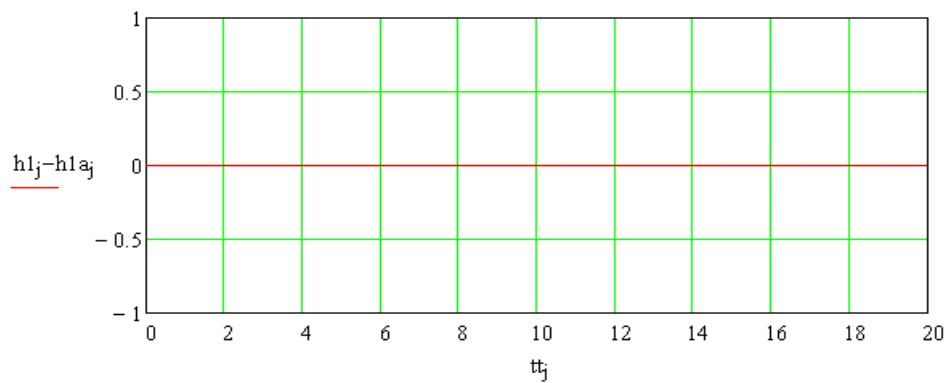


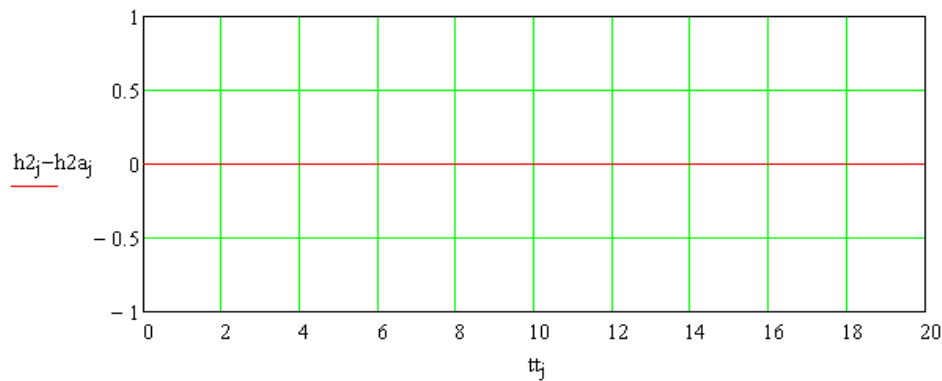
Рис.Д5. Графики изменения численных значений синапсов: а) значение синапса h_1 ;
 б) – значение синапса h_2 ; в) – значение синапса h_3 ; г) – значение синапса h_4 ;
 д) – значение синапса h_5

Так как величина отклонения Δn_{Σ} положительная и не превышает 2,5 % от $n_{\Sigma}^{уст}$, то активизированы только термы Н и ПС, и соответственно изменяются только третий и четвертый синапсы (рис. Д5 в, г) (для наглядности на

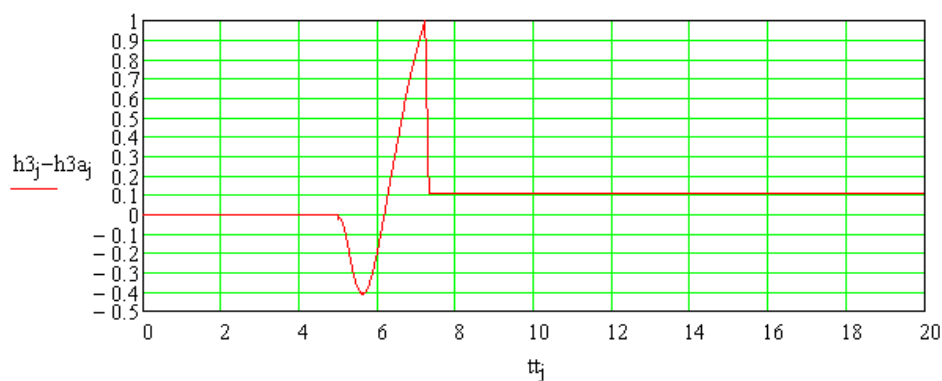
рис.Д5 в, г приведен только фрагмент графика, большие значения синапсов на графике обрезаны). При появлении некорректности в описании объекта управления (при изменении статики двигателя), величины синапсов h_3 и h_4 изменились (рис. Д6): На рис. Д6 показана разница в величине синапса, рассчитываемого нейро-нечетким регулятором при корректном и некорректном математическом описании объекта управления. Величина третьего синапса h_3 изменилась на $\approx 0,1$ в статике (рис.Д6 в), а величина четвертого синапса h_4 изменилась в среднем на $\approx 0,09$ в динамике (рис. Д6 г).



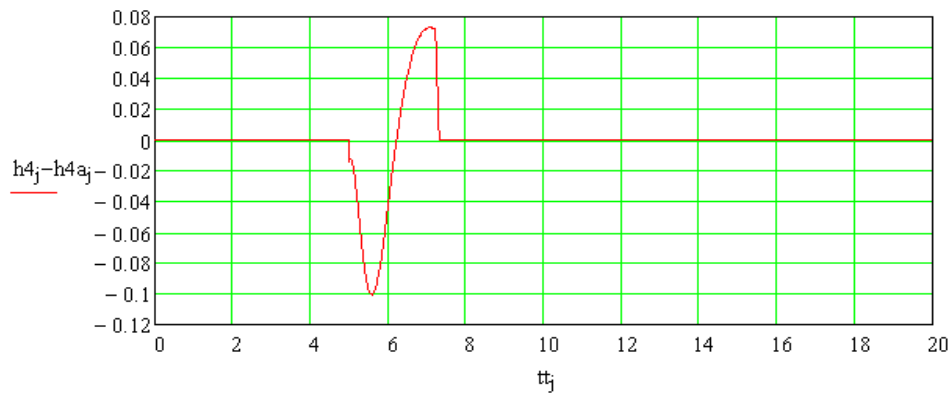
а)



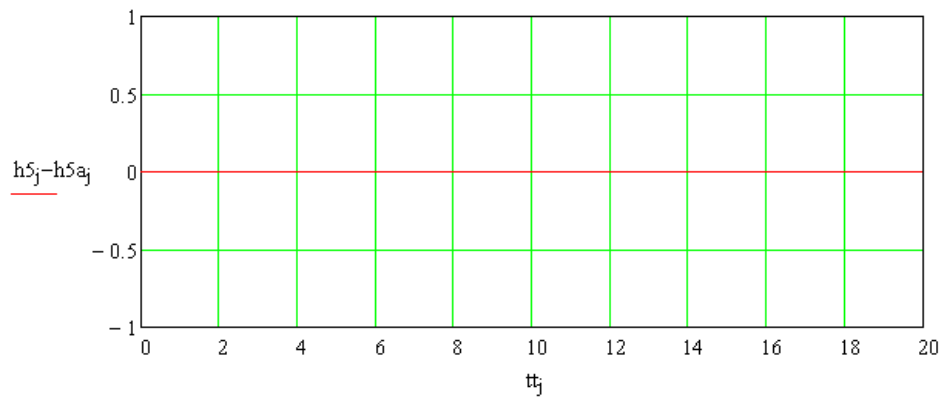
б)



в)



г)



д)

Рис.Д6. Изменение синапсов Δh_i , рассчитываемых нейро-нечетким регулятором при корректном и некорректном математическом описании объекта управления: а) изменение синапса h_1 ; б) – изменение синапса h_2 ; в) – изменение синапса h_3 ; г) – изменение синапса h_4 ; д) – изменение синапса h_5

При некорректном математическом описании объекта управления (при изменении статической характеристики двигателя по расходу топлива), результаты работы адаптивного нечеткого регулятора частоты вращения ротора вентилятора как на установившихся режимах, так и в динамике не изменились. и при этом синапсы изменились. Из этого можно сделать вывод об адаптивности разработанного адаптивного нечеткого регулятора.

Программная реализация адаптивного нечеткого регулятора

```
//-----
// Нечёткий регулятор (англ. fuzzy controller) – регулятор, построенный
// на базе нечёткой логики.
//-----
#include <math.h>

#include "fuzzy_control.h"

// Размер массива
#define FSIZE      (4)

// Границы (в зависимости от программного значения)
#define LIM_NEG_GREAT (-0.08) // -8% (отрицательное большое - ОБ)
#define LIM_NEG_AVERAGE (-0.01) // -1% (отрицательное среднее - ОС)
#define LIM_POS_AVERAGE (+0.01) // +1% (положительное среднее - ПС)
#define LIM_POS_GREAT (+0.08) // +8% (положительное большое - ПБ)

// Заданное отклонение
#define DEVIATION_MAX (0.05)

double fuzzy_controller (
    double set_value, // задание для определения терм
    double delta, // рассогласование
    double kf, // коэффициент регулятора
    double *w // указатель на массив синапсов

    #if defined USE_FUZZY_SCOPE
    ,
    double *y, // указатель на массив фаззификаторов
    double *mw, // указатель на массив произведений f*y

    double *fw // указатель на массив активационных функций
                // (для контроля)
    #endif
)
{
    #if !defined USE_FUZZY_SCOPE
    // Массивы значений (для контроля)
    double y [FSIZE]; // массив фаззификаторов
    double mw [FSIZE]; // массив произведений f*y
    // double fw [FSIZE]; // указатель на массив активационных функций
    #endif

    double sfn;
```

```

// с_corr - коэффициент коррекции ошибки,
// который в регуляторе принят равным 1.
double c_corr = 1;
//-----
// Фаззификатор
// представляет собой совокупность функций принадлежности (терм).
    { // start of block

double dl_a, dl_b, dl_c, dl_d, dl_e;
// double y;
// int i;

// Границы (в зависимости от программного значения)
dl_a = set_value * LIM_NEG_GREAT; // -8%
dl_b = set_value * LIM_NEG_AVERAGE; // -1%
dl_c = 0.0; // 0%
dl_d = set_value * LIM_POS_AVERAGE; // +1%
dl_e = set_value * LIM_POS_GREAT; // +8%

//-----
if ( delta <= dl_a ) {

    y[0] = 1.;

    y[1] = y[2] = y[3] = 0.;

} else
//-----
if ( delta <= dl_b ) {

    y[0] = 1. - ((delta - dl_a) / (dl_b - dl_a));

    y[1] = ((delta - dl_a) / (dl_b - dl_a));

    y[2] = y[3] = 0.;

} else
//-----
if ( delta <= dl_c ) {

    y[1] = 1. - ((delta - dl_b) / (dl_c - dl_b));

    y[0] = y[2] = y[3] = 0.;

} else
//-----
if ( delta <= dl_d ) {

    y[2] = ((delta - dl_c) / (dl_d - dl_c));

    y[0] = y[1] = y[3] = 0.;

```

```

} else
//-----
if ( delta <= dl_e ) {

    y[2] = 1. - ((delta - dl_d) / (dl_e - dl_d));
    y[3] = ((delta - dl_d) / (dl_e - dl_d));

    y[0] = y[1] = 0.;

} else {
//-----

    y[0] = y[1] = y[2] = 0.;
    y[3] = 1;

}
//-----
} // end of block

//-----
// Блок адаптации

    { // start of block

double deviation;

double sm;
double smw;

int i;

double dev_max;
double y_min;

y_min      = 0.008;

dev_max = DEVIATION_MAX;

if (
    ( y[0]<= y_min ) &&
    ( y[FSIZE-3]<= y_min ) &&
    ( y[FSIZE-2]<= y_min ) &&
    ( y[FSIZE-1]<= y_min )
)
{
    sm = 1;

} else {

    sm = 0;
    for ( i=0; i<FSIZE; i++ ) {

```

```

    sm += y[i] * y[i];

} //end for

}

do {

    smw = 0.;

    for ( i=0; i<FSIZE; i++ ) {

        mw[i] = y[i] * w[i];
        smw += mw[i];
    }

    deviation = delta - smw;

    for ( i=0; i<FSIZE; i++ ) {
        w[i] += c_corr * deviation * y[i] / sm;
    }

} while ( fabs(deviation) >= dev_max );

    } // end of block

//-----
// Активационный блок
// В качестве активационной функции в регуляторе используется
// симметричная сигмоидальная функция.
//  $F(x) = (1 - e^{*(-k*x)}) / (1 + e^{*(-k*x)})$ 
// Симметрично сигмоидальная функция принимает значения различных знаков
// относительно начала координат и в точке аргумента равного нулю -
// его значение равно нулю.
    { // start of block
double fn;
int i;

sfn = 0.;    // сумма := 0.

for ( i=0; i<FSIZE; i++ ) {

    // Симметрично сигмоидальная функция
    fn = (1. - exp(-kf * mw[i])) / (1. + exp(-kf * mw[i]));

    sfn += fn;    // сумма

#endif defined USE_FUZZY_SCOPE
    fw[i] = fn;
#endif

```

```
} // end for  
  
    } // end of block  
  
//-----  
return ( sfn );  
  
} // end double fuzzy_controller ()  
  
//-----
```

Акты внедрения



«УТВЕРЖДАЮ»

Управляющий директор АО «ОДК-СТАР»

С.В. Остапенко

«27» 03 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Титова Юрия Константиновича

Комиссия в составе:

Председатель комиссии А.А. Игнатов, Первый заместитель главного конструктора, начальник ОКБ АО «ОДК-СТАР»;

Член комиссии: Д.А. Сулимова, начальник отдела АО «ОДК-СТАР»

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы **«АДАПТИВНЫЕ НЕЧЕТКИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ГАРАНТИРОВАННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ»** использованы при проектировании и реализации элементов систем автоматического управления авиационными воздушно-реактивными двигателями (САУ ВРД) различного назначения.

В регуляторе электронном двигателя РЭД адаптивным нечетким регулятором реализована защита от неуправляемого повышения тяги двигателя, представляющая собой ограничитель частоты вращения вентилятора, воздействующий на исполнительный механизм, обеспечивающий слив избытков дозированного топлива.

В комплексном регуляторе двигателя КРД адаптивным нечетким регулятором реализован контур частоты вращения вентилятора, воздействующий на контур управления положением дозирующего устройства, который в свою очередь, тоже реализован адаптивным нечетким регулятором.

При создании САУ ВРД были использованы и внедрены следующие результаты диссертационной работы:

В соответствии с предложенными автором методиками выполнен синтез адаптивных нечетких регуляторов, разработаны корректирующие звенья (фильтры), учитывающие изменение инерционности объекта управления на всех режимах его работы, обеспечен гарантированный запас устойчивости системы управления.

Адаптивные нечеткие регуляторы систем управления ВРД, работающие в условиях жесткого реального времени, позволяют повысить качество управления за счет адаптации к изменяющемуся в процессе эксплуатации объекту управления и возможности реализации желаемого вида переходных процессов регулирования.

Применение результатов диссертационной работы обеспечивает уменьшение времени регулирования на единичное управляющее воздействие на 15 %, увеличивает запасы устойчивости по модулю и по фазе на 30% по сравнению с показателями, достигнутыми при работе САУ с традиционными регуляторами. Адаптивный нечеткий регулятор, примененный в САУ ВРД, обеспечил устойчивую работу системы управления положением дозирующего устройства при увеличении коэффициента усиления замкнутой системы в 15 раз.

Предложенные Титовым Ю.К. в его диссертационной работе решения будут использованы при проектировании контура стабилизации малоэмиссионного режима работы камеры сгорания перспективного турбореактивного двухконтурного двигателя.

Председатель комиссии




А.А. Игнатов

Член комиссии:

Д.А. Сулимова

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета

доктор технических наук



/ Н.В. Лобов /

2019 г.

о внедрении научных результатов,
полученных Титовым Юрием Константиновичем
при выполнении диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантируемой
устойчивостью»

Комиссия в составе:

Председатель: Костыгов А.М., канд. техн. наук, декан
Электротехнического факультета ПНИПУ

Члены комиссии: Кон Е.Л., канд. техн. наук, профессор кафедры
«Автоматика и телемеханика»,
Заневский Э.С., канд. техн. наук, доцент кафедры
«Автоматика и телемеханика»,

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
«Адаптивные нечеткие устройства систем управления с гарантируемой
устойчивостью» соискателя Титова Ю.К. используются для проведения
лекционных и практических занятий, лабораторных работ, курсового
проектирования в рамках программ магистратуры по направлению
подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах».

Предложенные научные основы создания и исследования принципов
построения и функционирования адаптивных нейро-нечетких регуляторов
систем управления воздушно-реактивными двигателями 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 виртуальных лабораторных стендов, реализованных в
среде моделирования *LabView* фирмы *National Instruments*.

Представленные в работе методы анализа и синтеза адаптивных
фильтров и корректирующих звеньев регуляторов систем управления

внедрены в рамках лекционных и практических занятий по дисциплине «Современные проблемы теории управления» программы магистратуры «Распределенные компьютерные информационно-управляющие системы», разработано сопровождающие их учебно-методические пособия.

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в повышении уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов (знаний, умений и владений) в области проектирования и реализации элементов (регуляторов и фильтров) систем управления сложными техническими объектами. в частности, воздушно-реактивными двигателями. Это соответствует требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования нового поколения, построенных с учетом требований профессиональных стандартов.

Результаты внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании Ученого совета ЭТФ 23.09.2019 г., протокол № 2.

Председатель комиссии:

канд. техн. наук, декан

Электротехнического факультета ПНИПУ  / А.М. Костыгов /

Члены комиссии:

канд. техн. наук, профессор кафедры

«Автоматика и телемеханика» ПНИПУ

канд. техн. наук, доцент кафедры

«Автоматика и телемеханика» ПНИПУ

 / Е.Л. Кон /

 / Э.С. Заневский /

« 16 » 10 2019 г.