

**На правах рукописи**

**ИДРИСОВ Ильдaр Ирекович**

**АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ  
И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ  
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа-2009**

Работа выполнена в ГОУ ВПО  
«Уфимский государственный авиационный технический университет»  
на кафедре вычислительной техники и защиты информации

Научный руководитель

д-р техн. наук, проф.

**Васильев Владимир Иванович**

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.

**Асанов Асхат Замилович**

проф. кафедры прикладной математики и информатики Приволжского Федерального Университета

д-р техн. наук, проф.

**Лянцев Олег Дмитриевич**

проф. кафедры АСУ УГАТУ

Ведущая организация

ФГУП УНПП «Молния», г. Уфа

Защита диссертации состоится 4 декабря 2009 года в 10-00 часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ ноября 2009 г.

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

**В.В. Миронов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

С расширением диапазона высот и скоростей полета летательных аппаратов (ЛА) появилась потребность в адаптации бортовых систем управления к условиям полета и режимам работы их силовых и энергетических установок. Современные газотурбинные двигатели (ГТД) представляют собой сложные технические объекты, которые отличаются многообразием протекающих в них физических процессов и характеризуются многомерностью, многосвязностью, нелинейностью, нестационарностью рабочих процессов, существенным влиянием режимов работы и внешних условий на характеристики их функционирования. Развитие и совершенствование ГТД сопровождается ужесточением требований к их системам автоматического управления (САУ), включая такие требования, как надежность, точность и качество процессов управления.

Современные подходы к построению высокоэффективных САУ ГТД основаны на работах А. А. Шевякова, Б. А. Черкасова, О. С. Гуревича, Ф. Д. Гольберга, Г. В. Добрянского, Т. С. Мартыановой, Ю. М. Гусева, В. Н. Ефанова, В. Г. Крымского, Ю. С. Кабальнова, Р. Л. Лейбова, О. Д. Лянцева, Л. Б. Уразбахтиной, А. И. Фрида и др.

К числу основных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании САУ ГТД, относятся факторы неопределенности, такие как неполнота априорной и рабочей информации, неточность математических моделей ГТД, погрешности датчиков и исполнительных механизмов, изменение характеристик двигателя в течение срока эксплуатации, возникновение возможных отказов функциональных элементов САУ. В качестве перспективного направления при решении задач проектирования САУ ГТД в последние годы рассматривается их построение в классе интеллектуальных систем управления, обеспечивающих робастность, адаптивность и отказоустойчивость процессов управления ГТД в условиях неопределенности.

Вопросам построения интеллектуальных систем управления (ИСУ) ГТД посвящены работы Б. Г. Ильясова, В. И. Васильева, Г. Г. Куликова, С. В. Епифанова, В. Ю. Арькова, С. С. Валеева, С. В. Жернакова, Р. А. Мунасыпова и др. В этих работах показана, в частности, возможность применения искусственных нейронных сетей (НС) для решения задач идентификации и управления ГТД. Использование НС-технологий должно обеспечить адаптацию алгоритмов управления ГТД в широком диапазоне изменения режимов работы и условий полета на основе механизмов обучения и самообучения.

Вместе с тем, анализ современной литературы, посвященной построению ИСУ ГТД, показывает, что многие задачи, связанные с построением НС-моделей ГТД и исполнительных механизмов (ИМ) систем топливопитания, нейросетевых адаптивных алгоритмов многорежимного управления ГТД, а также применением НС для оперативного контроля и диагностирования отказов датчиков, исполнительных механизмов и системы управления ГТД в целом, до

сих пор остаются открытыми. Вопросы программно-аппаратной реализации НС-алгоритмов управления и контроля САУ ГТД также требуют дополнительного исследования.

Таким образом, проблема разработки моделей, алгоритмов и программно-аппаратной реализации интеллектуальных систем управления ГТД с использованием современных нейросетевых технологий является своевременной и актуальной.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка теоретических и методических основ синтеза нейросетевых алгоритмов идентификации, многорежимного управления и обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД, позволяющих повысить эффективность процессов управления ГТД в условиях неопределенности.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование алгоритмов идентификации ГТД и их исполнительных механизмов на основе рекуррентных нейронных сетей.
2. Разработка и исследование алгоритмов синтеза и адаптации нелинейных многорежимных регуляторов ГТД на основе многослойных нейронных сетей.
3. Разработка и исследование алгоритмов обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД с использованием нейросетевых моделей их элементов и подсистем.
4. Оценка эффективности разработанных нейросетевых алгоритмов идентификации и управления ГТД и способов их программно-аппаратной реализации (ПЛИС).

### **Методика исследования**

Поставленные в работе задачи решались с использованием методов системного анализа, теории идентификации и теории автоматического управления, нейроинформатики, методов имитационного моделирования на ЭВМ.

### **Результаты, выносимые на защиту**

1. Алгоритмы и методика идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания на основе рекуррентных нейронных сетей.
2. Алгоритмы синтеза и адаптации нейросетевого регулятора ГТД на основе метода симплексного поиска и байесовской регуляризации.
3. Алгоритмы и методика синтеза отказоустойчивой САУ ГТД с использованием нейросетевых моделей ее функциональных элементов и подсистем.
4. Методика проектирования нейросетевых алгоритмов идентификации и управления ГТД, а также практические рекомендации по их технической реализации на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

### **Научная новизна результатов**

1. Предложены НС-алгоритмы динамической идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания, отличающиеся тем, что они основаны на использовании новых классов архитектур НС, таких как динамические перцептроны и рекуррентные сети Элмана, и алгоритмов обучения на основе байесовской регуляризации, что позволило повысить точность идентификации по сравнению с известными методами при наличии ограничений на вычислительные ресурсы БЦВМ.

2. Предложены алгоритмы синтеза и адаптации многорежимного нейросетевого регулятора ГТД, отличающиеся тем, что для компенсации нелинейных характеристик двигателя используется его нейросетевая обратная модель, обучаемая в режиме реального времени, что позволило повысить качество процессов управления в широком диапазоне изменения режимов работы двигателя.

3. Предложены алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД, основанные на использовании метода FDI (Fault Detection and Identification), отличающиеся тем, что обнаружение отказов в системе осуществляется путем анализа рассогласований выходов функциональных элементов САУ с выходами аналогичных элементов в эталонной нейросетевой модели САУ, настраиваемой в режиме реального времени, что позволяет повысить оперативность и достоверность обнаружения отказов в широком диапазоне изменения режимов работы и характеристик САУ ГТД.

4. Предложена формализованная процедура моделирования и отладки нейросетевых алгоритмов управления ГТД на основе ПЛИС в среде САПР «Quartus», отличающаяся тем, что задание функции активации нейронов осуществляется табличным способом, а структура НС определяется с помощью текстово-графического представления, что позволяет повысить наглядность процесса проектирования и сократить требуемые вычислительные ресурсы на реализацию алгоритмов.

#### **Практическая значимость работы**

Разработаны инженерные методики синтеза и моделирования НС-алгоритмов идентификации и управления ГТД, применение которых позволяет формализовать основные этапы анализа, синтеза и моделирования САУ ГТД. Предложена методика анализа устойчивости нелинейной САУ ГТД с НС-регулятором, основанная на использовании теоремы о малом коэффициенте усиления. Разработаны методические и практические рекомендации по реализации НС-моделей и алгоритмов управления ГТД на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) в САПР «Quartus».

#### **Апробация работы**

Основные положения, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на:

– VII, IX–XI Международных научных конференциях «Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT)» (Уфа, 2005, 2007; Анталья, Турция, 2008; Ретимнон, Греция, 2009);

- Четвертой Международной научной молодежной школе «Нейроинформатика и системы ассоциативной памяти» (Таганрог, 2008);
- Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2008);
- III и IV Всероссийских зимних школах-семинарах аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (г. Уфа, 2008, 2009);
- Российско-немецком семинаре «Инновационные информационные технологии: теория и практика» (г. Уфа, 2009).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 1 статья в рецензируемом журнале из перечня изданий, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного материала, заключения, приложений и библиографического списка. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста и включает 59 рисунков, 16 таблиц. Библиографический список содержит 144 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается общая характеристика работы: цель исследования, актуальность решаемых задач, определяется научная новизна и практическая значимость защищаемых результатов.

**В первой главе** проводится анализ существующих подходов к построению САУ ГТД в классе иерархических интеллектуальных систем управления (ИСУ), приводятся требования к перспективным САУ ГТД. Дается классификация задач, решаемых САУ ГТД с иерархической организацией уровней управления, приводятся критерии интеллектуальности этих систем. Показана возможность повышения эффективности САУ ГТД на основе применения алгоритмов интеллектуального управления.

Проводится сравнительный анализ различных парадигм вычислительного интеллекта (экспертные системы, нейросетевые структуры, алгоритмы нечеткой логики и т.д.) с точки зрения перспектив их применения для решения задачи интеллектуального управления ГТД. Показаны преимущества использования нейросетевой парадигмы для решения данной задачи.

Рассмотрены различные подходы к решению задачи идентификации ГТД в реальном времени, адаптации алгоритмов управления и обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД. На основе проведенного анализа предложена обобщенная структурная схема иерархической интеллектуальной системы управления ГТД, раскрывающая функции алгоритмов управления на различных уровнях САУ (рис. 1).

Согласно выбранной нейросетевой парадигме, база знаний ИСУ ГТД представляется в виде нескольких нейронных сетей, распределенных по

уровням управления. Информационный обмен между отдельными НС осуществляется либо напрямую, либо посредством использования дополнительных логических блоков.

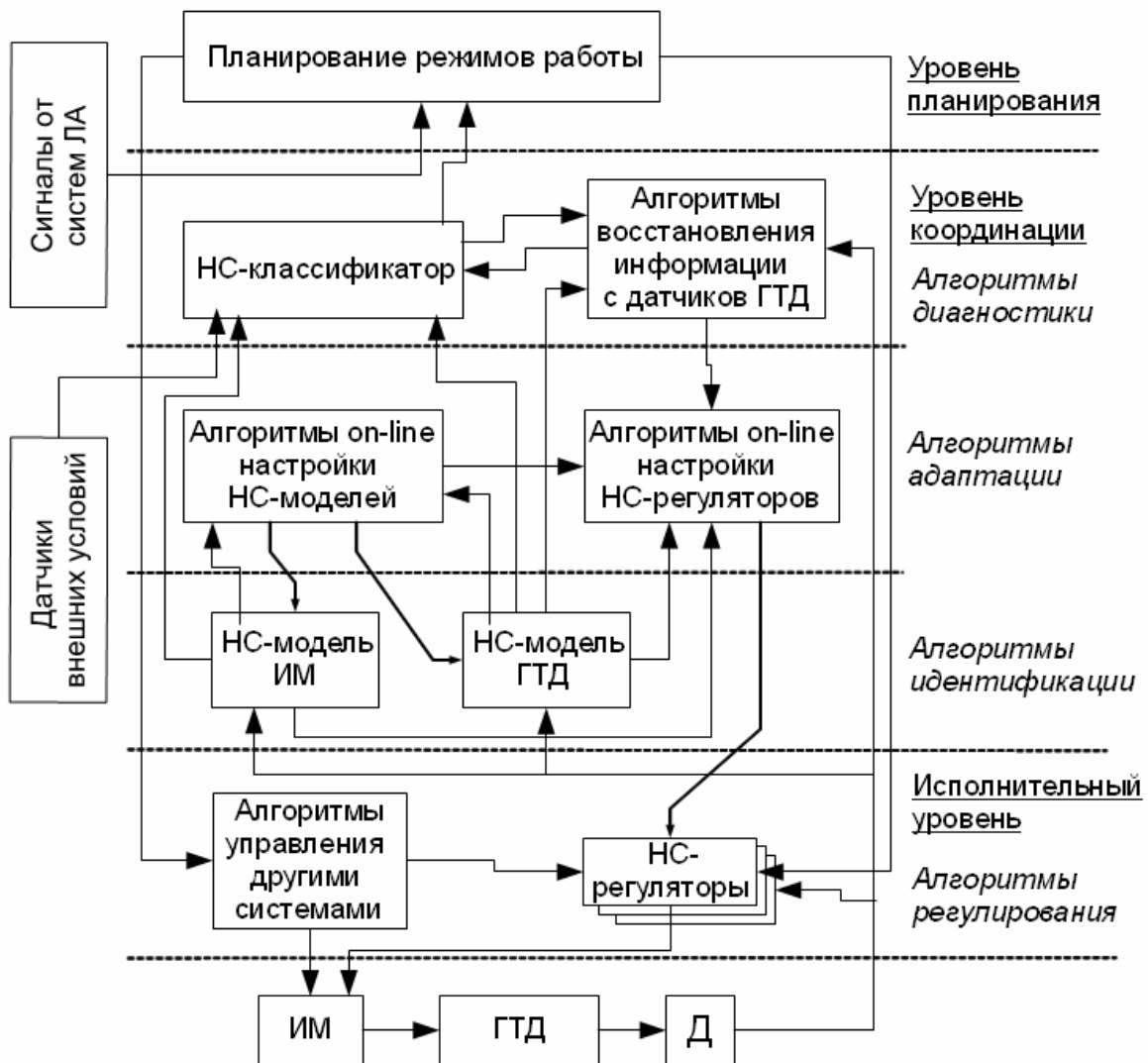


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема ИСУ ГТД  
(Д – датчики, ИМ – исполнительные механизмы)

Проведенный анализ работ в области разработки нейросетевых ИСУ ГТД показал, что в данной области остаются нерешенными такие задачи, как: задача адаптации НС-модели под конкретный экземпляр двигателя с учетом старения и изменения условий его эксплуатации; задача идентификации гидромеханических исполнительных механизмов системы топливопитания; задача выбора архитектуры НС-регуляторов и их применения в САУ с селектированием каналов; задача адаптации НС-регуляторов с использованием НС-моделей ГТД в режиме реального времени; задача оперативного контроля и диагностирования отказов датчиков, исполнительных механизмов и системы управления ГТД в целом.

Отмечается, что одной из актуальных проблем в теории нейронных сетей является проблема определения оптимальной структуры нейронной сети, адекватной решаемой задаче. Для решения данной проблемы применительно к САУ ГТД в работе предлагается использование алгоритмов обучения НС с байесовской регуляризацией.

Формулируется цель исследования и задачи, решаемые в диссертационной работе.

**Во второй главе** рассматривается задача идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания на основе нейронных сетей. Осуществляется выбор топологии и структуры НС, даны рекомендации по построению обучающей выборки и выбору алгоритмов обучения НС. Рассмотрены алгоритмы решения задачи нейросетевой идентификации ИМ и ГТД в широком классе архитектур НС (персептроны, динамические персептроны, рекуррентные сети Элмана). Исследованы зависимости точности идентификации от архитектуры, структуры и методик формирования обучающей выборки НС.

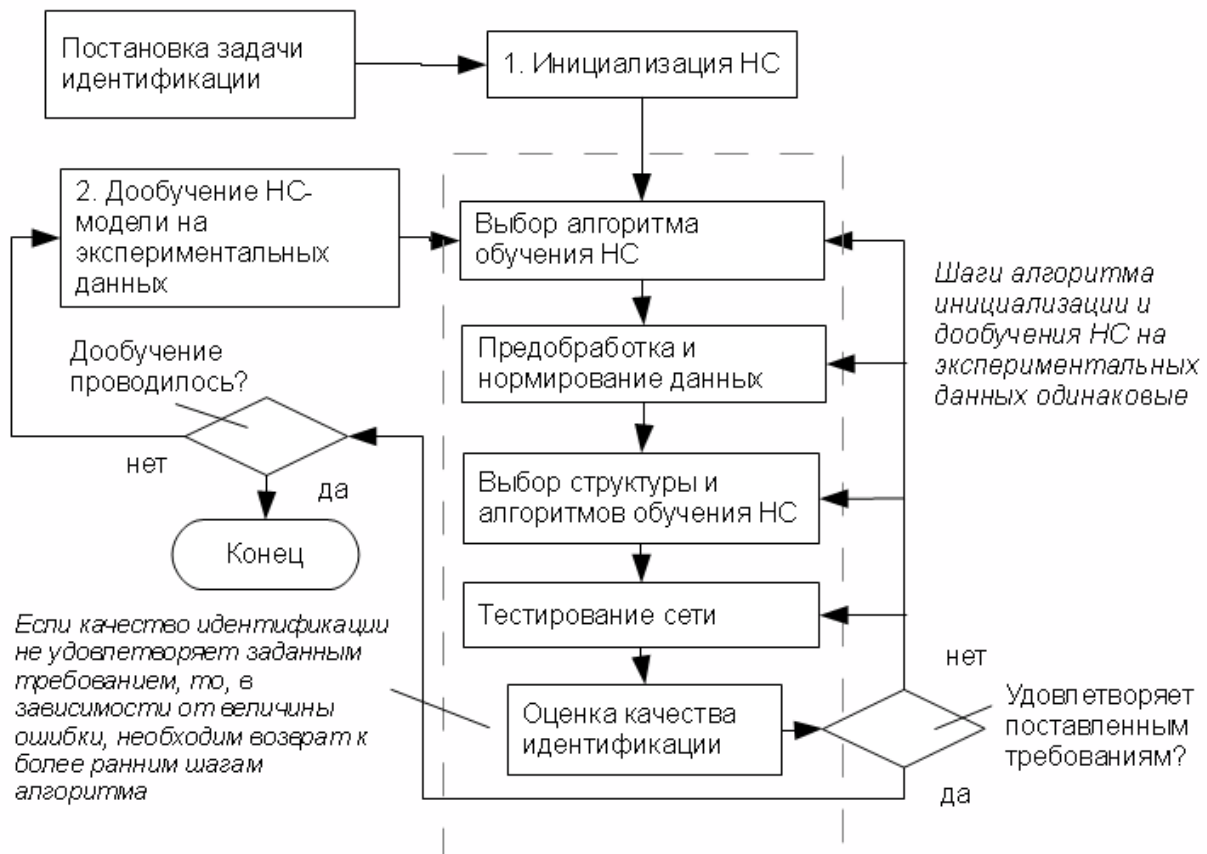


Рисунок 2 – Блок-схема методики нейросетевой идентификации ГТД и ИМ

В качестве базовой методики для решения задачи идентификации НС-моделей на примере двухвального ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания (дозатора топлива) используется подход, основанный на пред-



варительном обучении (инициализации) НС-моделей с использованием данных, полученных с помощью известных математических моделей ГТД и ИМ, таких как поэлементные математические модели (ПММ) и кусочно-линейные динамические модели (КЛДМ), и последующей адаптацией полученных НС-моделей к конкретным экземплярам объектов идентификации (рис. 2).

На этапе обучения НС использовался алгоритм Левенберга-Маркуордта с байесовской регуляризацией, основанной на использовании регуляризующего члена в выражении для ошибки обучения:

$$E_i = \alpha \sum_{k=k_1}^{k_1+L} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(k)^2 + \beta \sum_{m=1}^M \sum_{st} W_{st}^2,$$

где  $\varepsilon_i(k) = y_i(k) - y_i^{НС}(k)$  – рассогласование между значениями  $i$ -го измеряемого параметра ГТД и соответствующего выхода НС-модели;  $[k_1, k_1+L]$  – «временное окно» данных в пределах которого осуществляется настройка (обучение) НС;  $W_{st}^{(m)}$  – веса синаптических связей НС;  $m$  – номер слоя НС ( $m = 1, \dots, M$ ), в нашем случае, для 3-слойной сети  $M=2$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  – экспериментально подбираемые веса для отдельных составляющих ошибки обучения ( $\alpha + \beta = 1$ ).

На основе предложенной методики разработаны алгоритмы нейросетевой идентификации ИМ и адаптации полученной НС-модели для конкретного экземпляра ИМ. В качестве источника данных для инициализации НС-модели была использована ПММ исполнительного механизма системы топливопитания.

Показано, что предложенная методика идентификации позволяет решать задачу идентификации конкретного экземпляра ИМ со среднеквадратической ошибкой (СКО) по величине расхода топлива в камеру сгорания, равной 0,55%. Максимальная величина погрешности при этом составила  $\delta G_T = 1,5\%$ . Установлено, что наилучшее качество идентификации обеспечивается при использовании НС-модели ИМ на основе 3-слойного персептрона, содержащего 6 нейронов в скрытом слое.

Рассмотрены алгоритмы нейросетевой идентификации ГТД и адаптации полученной НС-модели для конкретного экземпляра двухвального двигателя. В качестве источника данных для инициализации НС-модели использовалась КЛДМ ГТД. В качестве базового алгоритма обучения было предложено использовать алгоритм Левенберга-Маркуордта с байесовской регуляризацией. Установлено, что наилучшее качество идентификации ГТД обеспечивает рекуррентная сеть Элмана с 12 нейронами в скрытом слое (рис. 3).

В результате применения предложенной методики адаптации для предварительно обученной НС-модели установлено, что задача идентификации конкретного экземпляра ГТД решается со значением СКО на переходных режимах,

равными  $\delta n_1 = 0,68\%$ ,  $\delta n_2 = 0,63\%$ ,  $\delta \Pi_K^* = 0,82\%$ ,  $\delta T_4^* = 0,15\%$ , и с СКО на установившихся режимах -  $\delta n_1 = 0,49\%$ ,  $\delta n_2 = 0,48\%$ ,  $\delta \Pi_K^* = 0,61\%$ ,  $\delta T_4^* = 0,04\%$ .

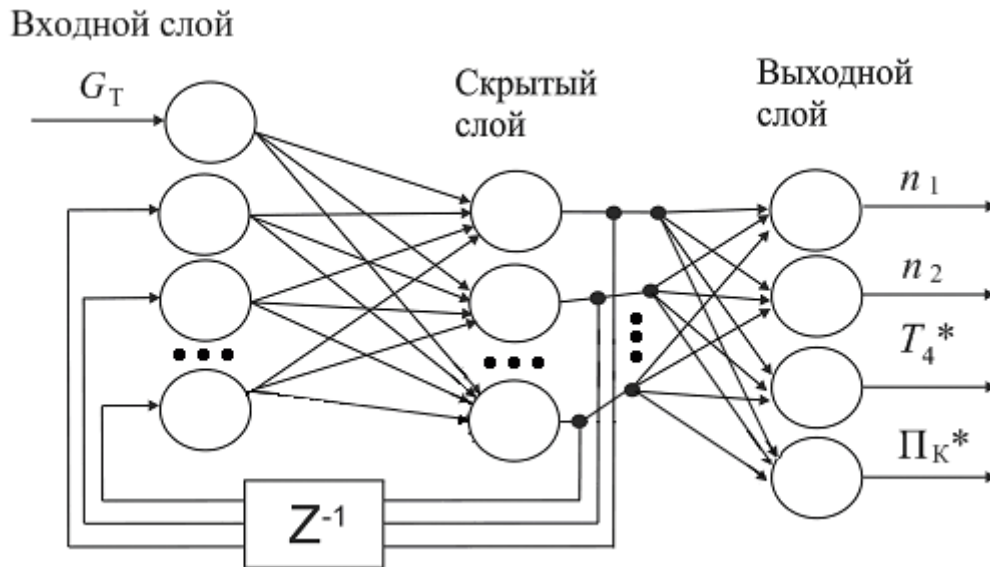


Рисунок 3 – НС-модель ГТД на основе рекуррентной сети Элмана

Также был проведен эксперимент, позволяющий оценить точность НС-модели в условиях зашумления регулируемых параметров. В канал датчиков частоты вращения  $n_1$  и  $n_2$  добавлялся равномерно распределенный шум в интервале до  $\pm 1\%$  от максимального значения этих параметров. Было установлено, что СКО идентификации НС-модели ГТД в данных условиях не превышает 1,24%.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что применение предложенного подхода позволяет повысить качество идентификации НС-моделей для конкретных экземпляров ГТД и ИМ, и, кроме того, сокращает время, требуемое для реализации процедуры адаптации НС-модели, на 60-80%.

**В третьей главе** проводится анализ способов построения многорежимных регуляторов ГТД и обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД на основе нейронных сетей.

На рис. 4 представлены основные варианты включения НС-регуляторов в астатических САУ ГТД.

Для схемы, изображенной на рис. 4, а, где целью обучения супервизорной НС является минимизация рассогласования между выходами САУ и ее эталонной модели (ЭМ), разработан алгоритм обучения НС, используемой для настройки коэффициентов ПИД-регулятора на основе метода симплексного поиска. Суть данного метода состоит в том, что движение к оптимуму в  $n$ -мерном пространстве варьируемых параметров (в нашем случае, выходов НС, которые представляют собой настраиваемые коэффициенты усиления ПИД-регулятора), осуществляется путем последовательного отражения вершин симплекса отно-

сительно одной из его граней. Симплекс – это фигура в  $n$ -мерном пространстве, образованная  $(n + 1)$  вершинами, не принадлежащими ни одному из пространств меньшей размерности.

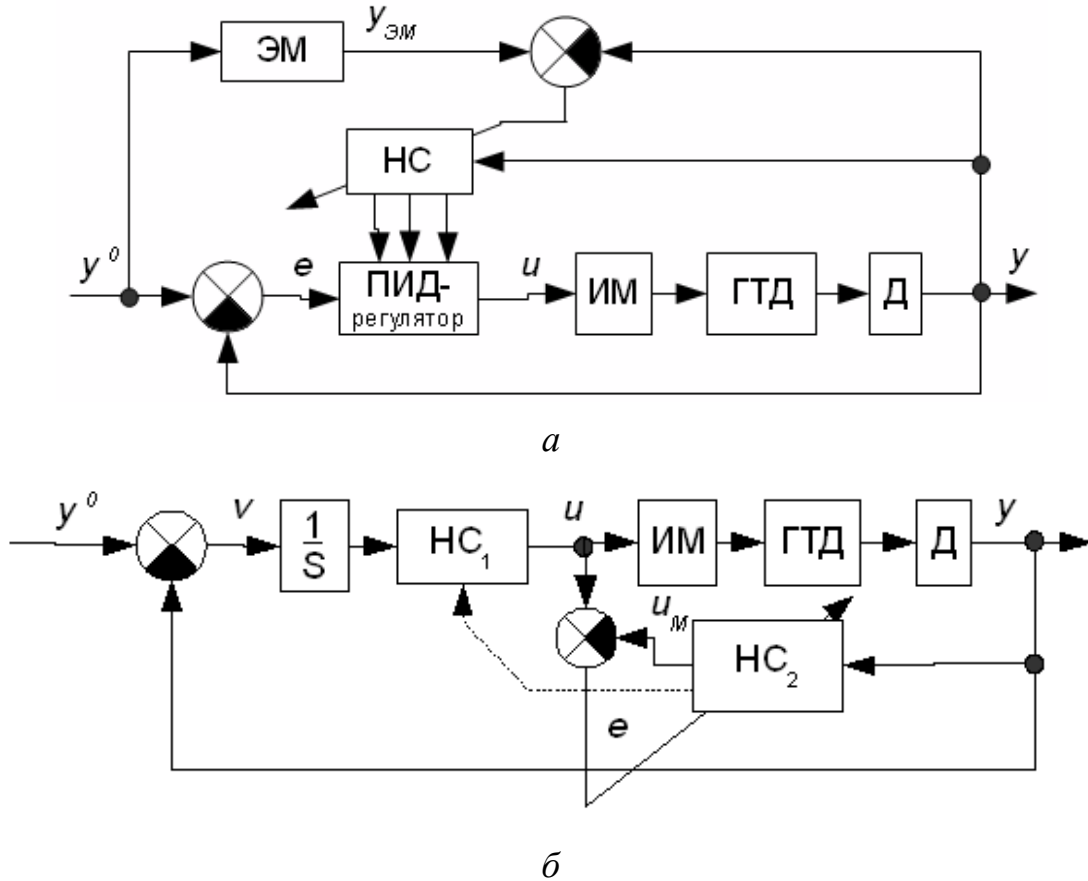


Рисунок 4 – Схемы включения НС-регулятора в САУ ГТД

Для схемы, изображенной на рис. 4, б, предложен алгоритм адаптации параметров многорежимного нейросетевого регулятора ГТД на основе обратной модели ГТД с использованием рекуррентной НС, дообучаемой в режиме реального времени. Предполагается, что сеть НС<sub>2</sub> непрерывно обучается в процессе функционирования САУ, а сеть НС<sub>1</sub> формирует управляющее воздействие на ИМ ГТД, причем после очередного цикла дообучения (адаптации) сети НС<sub>2</sub> ее параметры копируются в управляющую часть САУ – сеть НС<sub>1</sub>.

Предложена методика анализа абсолютной устойчивости нелинейной САУ ГТД с НС-регулятором на основе теоремы о малом коэффициенте усиления. Рассмотрен случай, когда ГТД как объект управления на различных режимах описывается набором передаточных функций  $W_{ГТД}^{(r)}(s)$ , где  $r$  – номер базового режима эксплуатации двигателя ( $r=1, \dots, R$ ), а обученный НС-регулятор описывается нелинейным отображением  $u = \Phi(x)$ . Методика анализа устойчивости включает в себя следующие этапы: 1) приведение структурной схемы САУ ГТД к эквивалентной структурной схеме «нелинейный элемент – линей-

ная часть»; 2) построение нелинейной характеристики «вход-выход» НС-регулятора и определение граничного коэффициента усиления ( $c$ ) сектора ее изменения; 3) вычисление максимального собственного числа замкнутой линейной система описываемой матрицей передаточных функций  $\mathbf{H}^{(r)}(s) = \mathbf{W}_{\text{ЛЧ}}^{(r)}(s) \left[ \mathbf{I} + c\mathbf{W}_{\text{ЛЧ}}^{(r)}(s) \right]^{-1}$ , где  $\mathbf{W}_{\text{ЛЧ}}^{(r)}(s)$  – матрица передаточных функций линейной части САУ для  $r$ -го режима работы ГТД; 4) построение амплитудно-фазовых характеристик линейной части САУ ГТД и принятие решения об устойчивости САУ на указанном множестве режимов.

Приведен пример, показывающий особенности применения предложенной методики анализа устойчивости для конкретных характеристик САУ ГТД.

Разработан алгоритм и методика синтеза нейросетевого регулятора, применяемого в составе системы автоматического управления ГТД с селектированием каналов управления. В современных САУ ГТД селекторы используются в САУ для устранения зоны совместной работы различных каналов управления. В работе показана возможность построения НС-регулятора, позволяющего совмещать функцию регулирования с селектированием каналов управления.

Для обеспечения требуемой точности аппроксимации при меньших вычислительных затратах, было предложено представить НС-регулятор в виде двух НС, позволяющих реализовать функции селектирования.

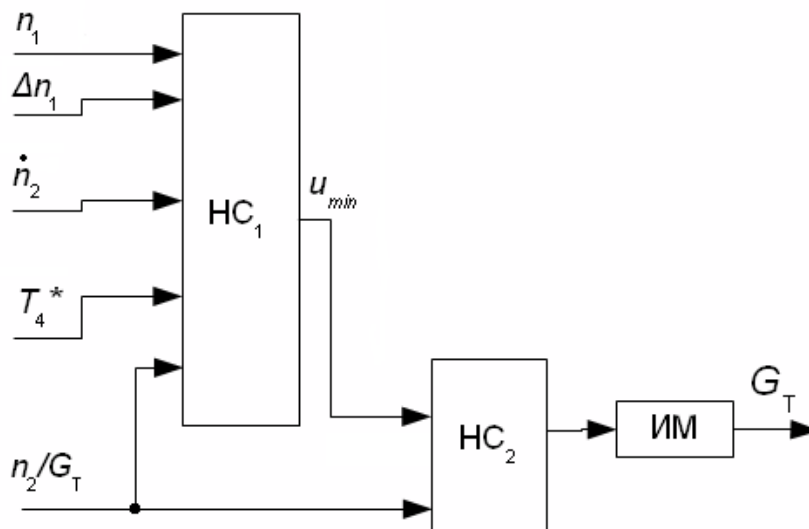


Рисунок 5 – Структурная схема нейросетевого регулятора ГТД с селектированием каналов

На рис. 5 показана схема реализации нейросетевого регулятора ГТД, где сеть  $\text{НС}_1$  обеспечивает аппроксимацию характеристик селектора по минимуму, а  $\text{НС}_2$  – селектора по максимуму. Здесь  $\dot{n}_2$  – производная по частоте вращения ротора компрессора высокого давления;  $\Delta n_1$  – величина ошибки управления по

частоте вращения ротора компрессора низкого давления  $n_1$ , ИМ – исполнительный механизм (дозатор топлива).

С целью выбора оптимальной структуры НС был проведен ряд экспериментов. Наибольшая точность обучения была получена для НС<sub>1</sub>, содержащей 5 нейронов в скрытом слое, для НС<sub>2</sub> – 3 нейрона в скрытом слое. Установлено, что поставленные требования к показателям качества процессов управления при этом выполняются на заданном множестве режимов работы ГТД.

Разработана методика построения отказоустойчивой САУ ГТД с использованием НС на основе метода FDI (Fault Detection and Identification). В рамках данного метода выбрана архитектура, структура и алгоритм обучения НС, реализующей функции блока диагностирования отказов (НС-классификатора). Алгоритм работы НС-классификатора при этом основан на анализе невязок между выходами элементов исследуемой САУ ГТД и ее НС-модели, обучаемой на основе данных, полученных как на нормальных, так и на нештатных режимах, обусловленных возникновением отказов.

На рисунке 6 изображена схема построения отказоустойчивой САУ ГТД, где НС<sub>1</sub> – нейросетевой регулятор с селективированием каналов управления, представляющий собой НС-модель цифрового регулятора; НС<sub>2</sub> – нейросетевая модель ГТД; НС<sub>3</sub> – нейросетевая модель ИМ. НС-классификатор)реализован на базе 3-слойного динамического персептрона.

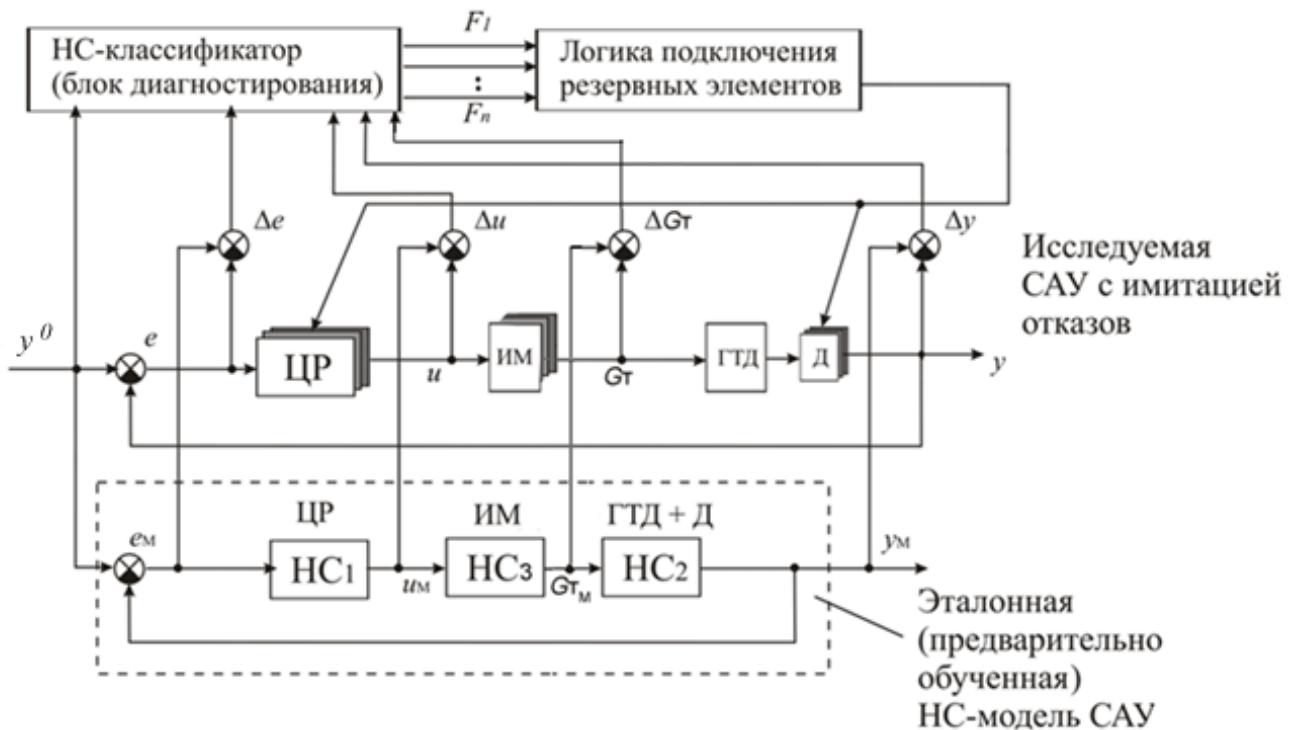


Рисунок 6 – Схема отказоустойчивой САУ ГТД

Входными сигналами для нейросетевого классификатора являются:  $\Delta e$  – невязка по ошибке управления;  $\Delta u$  – невязка по выходному сигналу цифрового регулятора (ЦР);  $\Delta y$  – вектор невязки по выходным параметрам САУ ГТД;  $\Delta G_t$  – невязка по расходу топлива;  $y^0$  – величина уставки управления. Выходом нейросетевого классификатора является вектор  $F_1, \dots, F_N$ , элементы которого принимают значения 0 или 1, в зависимости от сложившейся ситуации в САУ.

Исследовались зависимости показателей качества процессов контроля и диагностирования САУ от выбора архитектуры и структуры НС. Наилучшее качество распознавания отказов достигалось при построении НС-классификатора на основе динамического персептрона, с задержкой значений входных сигналов на 4 такта и 7 нейронами в скрытом слое.

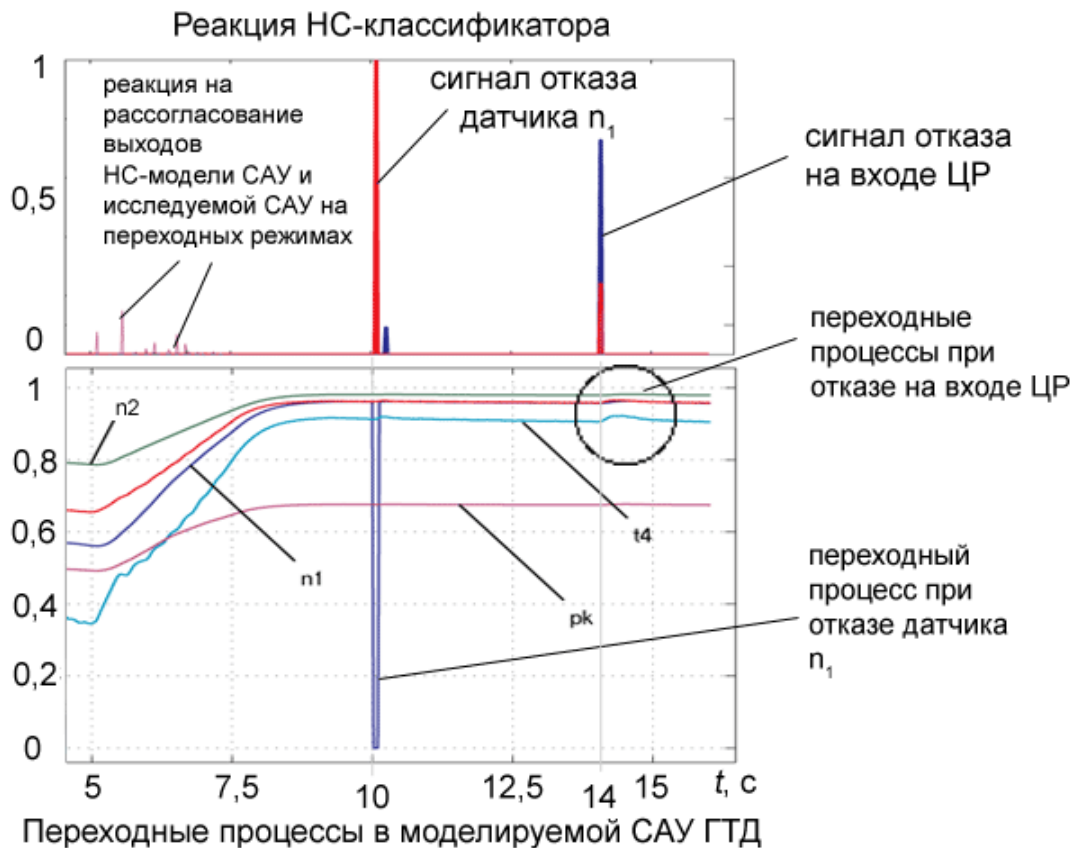


Рисунок 7 – Результаты имитационного моделирования процессов распознавания и парирования отказов в САУ ГТД

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов в исследуемой САУ имитировались два последовательных отказа: обрыв датчика частоты вращения  $n_1$  в момент времени  $t = 10$  с, и наводка (помеха) на входе ЦР ( $t = 14$  с). На рисунке 7 показаны переходные процессы в САУ ГТД при возникновении отказов и соответствующая реакция НС-классификатора. В момент времени  $t = 10,05$  с на соответствующем выходе НС-классификатора появляется сигнал, равный единице, что соответствует отказу датчика  $n_1$  (обрыв). Логика

подключения резервных элементов реагирует на данный сигнал и подключает резервный датчик. В момент времени  $t = 14,05$  с сеть распознает очередной сымитированный отказ (отказ ЦР) и, после переключения на резервный элемент, выходные параметры ГТД приходят к нормальным значениям через  $(0,5...1)$  с (время отработки возмущений регулятором).

Результаты проведенного имитационного моделирования САУ ГТД подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов диагностики отказов и обеспечения отказоустойчивости САУ. Время надежного распознавания для рассмотренных видов отказов при этом составило 50 мс (2 такта работы системы).

**В четвертой главе** приводится методика синтеза интеллектуальной системы управления ГТД на основе нейронных сетей, проводится анализ основных способов аппаратной реализации нейровычислителей, решается задача программно-аппаратной реализации разработанных нейросетевых моделей на элементной базе ПЛИС.

Общая методика проектирования НС-алгоритмов управления ГТД базируется на предложенных во второй и третьей главах алгоритмах анализа и синтеза нейросетевых моделей ГТД, НС-регуляторов и обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД. Применение данной методики позволяет автоматизировать процесс разработки и уменьшить сроки проектирования ИСУ ГТД.

С целью оценки требуемых аппаратных затрат при реализации разработанных алгоритмов НС-управления, определены требования, предъявляемые к бортовым вычислителям САУ ГТД. Делается вывод о том, что существующие бортовые вычислительные системы не обеспечивают реализацию предложенных НС-алгоритмов. На основании проведенного в работе сравнительного анализа различных способов программно-аппаратной реализации НС-моделей, основанных на использовании универсальных процессоров, цифровых сигнальных процессоров, специализированных процессоров (нейрочипов), заказных СБИС и ПЛИС, сделан вывод о том, что ПЛИС в наибольшей степени удовлетворяют критерию эффективности реализации НС-алгоритмов управления и контроля в САУ ГТД.

Приведены примеры программно-аппаратной реализации НС-моделей исполнительного механизма системы топливопитания (дозатора топлива), двухвального ГТД и НС-регулятора на элементной базе ПЛИС в САПР «Quartus». Показано, что спроектированные НС удовлетворяют поставленным требованиям по точности и вычислительным затратам.

Рассмотрены вопросы реализации информационного обмена разработанного нейровычислителя с бортовыми системами САУ ГТД с использованием интерфейсов MIL-STD-1553 и ARINC-429.

**В заключении** приводятся основные результаты, полученные в процессе исследований, и делаются соответствующие выводы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложена методика динамической идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания с использованием НС. Показано, что полученные НС-модели пригодны для использования их в составе САУ ГТД. Исследованы зависимости точности идентификации от архитектуры, структуры и методики формирования обучающей выборки НС. Предложена методика НС-идентификации ГТД с использованием алгоритмов регуляризации. Показано, что данный подход обеспечивает уменьшение погрешности идентификации на 1,9% (до 0,55%) для индивидуального экземпляра ИМ и на 2,7% (до 0,82%) для индивидуального экземпляра ГТД по сравнению с известными методами, основанными на интерполяции нелинейных характеристик объекта.

2. Решена задача синтеза алгоритма обучения супервизорной НС, используемой для настройки коэффициентов ПИД-регулятора ГТД, и синтеза адаптивного многорежимного нейросетевого регулятора ГТД, включая нейросетевой регулятор с селективированием каналов управления. Предложена методика анализа устойчивости САУ ГТД с многорежимным нейросетевым регулятором на основе теоремы о малом коэффициенте усиления.

3. Разработаны алгоритмы обеспечения отказоустойчивости системы автоматического управления ГТД с использованием нейросетевых моделей ее элементов и подсистем на основе метода FDI. Показано, что данный подход позволяет осуществлять распознавание отказов за время (25÷75) мс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным САУ ГТД.

4. Проведена оценка эффективности предложенных нейросетевых алгоритмов идентификации и управления ГТД, даны рекомендации по их программно-аппаратной реализации на специализированной элементной базе ПЛИС.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемом журнале из списка ВАК*

1. Алгоритмы проектирования и анализа устойчивости интеллектуальной системы управления ГТД / В. И. Васильев, И. И. Идрисов // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. ун-та. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». 2008. Т. 11, №1 (28). С. 34–42.

### *В других изданиях*

2. Идентификация параметров ГТД с использованием нейронной сети / И. И. Идрисов // Туполевские чтения : междунар. молодежн. науч. конф., посв. 1000-летию г. Казани. Казань : КГТУ, 2005. Т. 4. С. 39–40.



3. Идентификация параметров ГТД с использованием нейронной сети / И. И. Идрисов // VIII Королевские чтения. Сб. тр. всерос. молодежн. науч. конф. Самара : СГАУ им. С. П. Королева, 2005. С. 307.

4. Синтез алгоритмов и моделирование процессов управления в ЧС / В. И. Васильев, И. У. Ямалов, И. И. Идрисов, Т. М. Буреева // Компьютерные науки и информационные технологии : CSIT'2005 : междунар. науч. изд-е. Уфа : УГАТУ, 2005. Т. 2. С. 122–125 (Статья на англ. яз.).

5. Синтез и исследование адаптивных нейросетевых алгоритмов управления газотурбинного двигателя / И. И. Идрисов // Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2006 : 7-я междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : ТРТУ, 2006. Т.2. С. 267–271.

6. Алгоритм адаптивного нейросетевого управления ГТД / И. И. Идрисов // Вычислительная техника и новые информационные технологии: межвуз. науч. сб. Отв. ред. В. И. Васильев. Уфа : УГАТУ, 2007. Вып. 6. С. 64–69.

7. Адаптивное управление газотурбинным двигателем с использованием нейронных сетей / И. И. Идрисов // Компьютерные науки и информационные технологии : CSIT'2007 : междунар. науч. изд-е. Уфа : УГАТУ, 2007. Т. 3. С. 1–3. (Статья на англ. яз.).

8. Интеллектуальные алгоритмы управления и идентификации авиационного двигателя / И. И. Идрисов, С. С. Москвичев // Мавлютовские чтения : сб. тр. всерос. молодежн. науч. конф., посв. 75-летию УГАТУ. Уфа : УГАТУ, 2007. Т. 3. С. 96.

9. Исследование абсолютной устойчивости системы управления много-режимным динамическим объектом с нейросетевым регулятором / И. И. Идрисов, Н. В. Кучкарова // Актуальные проблемы в науке и технике : сб. ст. всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Диалог, 2008. Т. 1. С. 314–320.

10. Синтез и техническая реализация нейросетевых алгоритмов идентификации и управления ГТД на базе бортовых высокопроизводительных вычислительных систем / И. И. Идрисов // Нейроинформатика и системы ассоциативной памяти : 4-я междунар. молодежн. школа. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2008. С. 139–144.

11. Синтез многорежимных систем автоматического управления с использованием нейросетевых регуляторов / В. И. Васильев, И. И. Идрисов // Компьютерные науки и информационные технологии : CSIT'2008 : междунар. науч. изд-е. Уфа : УГАТУ, 2008. Т. 1. С. 105–109. (Статья на англ. яз.).

12. Алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД / В. И. Васильев, И. И. Идрисов // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий : сб. науч. тр. Уфа : Гилем, 2008. С. 185–190.

13. Нейросетевые технологии проектирования САУ ГТД / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Инновации в информационных технологиях:

теория и практика : Российско-немецкий сем. Уфа : УГАТУ, 2009. С. 72–77. (Статья на англ. яз.).

14. Разработка нейросетевых алгоритмов управления газотурбинного двигателя / И. И. Идрисов // Актуальные проблемы науки и техники Информатика, управление компьютерные науки : сб. тр. 4-й всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Диалог, 2009. Т. 1. С. 231–235.

15. Проектирование перспективных нейросетевых САУ ГТД / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Компьютерные науки и информационные технологии : CSIT'2008 : междунар. науч. изд-е. Уфа : УГАТУ, 2009. Т. 1. С. 13–18. (Статья на англ. яз.).

Диссертант

**Идрисов И.И.**

ИДРИСОВ Ильдар Ирекович

АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ГАЗОТУРБИННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ  
НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 30.10.2009. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.  
Усл. Печ. л. 1,0. Усл. кр.- отт.1,0. Уч.- изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 546.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический уни-  
верситет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа-центр, ул.К.Маркса, 12