

На правах рукописи

МАКАРОВ Андрей Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМИ ГТД
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ
И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Специальность: 05.13.01

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

Уфа – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ 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. Валеев Сагит Сабитович зав. кафедрой информатики Уфимского государственного авиационного технического университета к-т техн. наук, доц. Гиниятуллин Вахит Мансурович доц. кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики Уфимского государственного нефтяного технического университета
Ведущая организация	ОАО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния»

Защита состоится «16» декабря 2011 г. в 10 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 «15» ноября 2011 г.

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

В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние десятилетия развитие и совершенствование авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) сопровождается ужесточением требований к надежности и эффективности их систем автоматического управления (САУ). Современные ГТД являются сложными комплексными техническими устройствами, 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. Перечисленные особенности приводят к формированию устойчивой тенденции в развитии САУ ГТД, характеризующейся постоянным ростом сложности и числа решаемых с их помощью задач. Одной из важных задач является совершенствование методов и алгоритмов управления и контроля ГТД и необходимость обеспечения отказоустойчивости САУ, что обусловлено наличием жестких требований к обеспечению безопасности и экономичности полетов.

Важным направлением в обеспечении отказоустойчивости САУ ГТД является совершенствование их архитектуры на основе базовой концепции FADEC (Full Authority Digital Engine Control), заключающейся в построении цифровой системы управления двигателем с полной ответственностью. Современные бортовые САУ ГТД типа FADEC объединяют функции управления двигателем, а также функции контроля технического состояния, диагностики отказов элементов САУ и их парирования. Наряду с традиционными задачами, САУ ГТД нового поколения должны решать дополнительные задачи, связанные с принятием оперативных решений на основе накопленных знаний в условиях неопределенности и адаптации (т.е. изменения своей структуры и параметров) в случае возникновения возможных нештатных ситуаций.

Большой вклад в исследование и разработку высокоэффективных САУ ГТД внесли отечественные ученые: А. А. Шевяков, С. А. Сиротин, О. С. Гуревич, Т. С. Мартынова, Ф. Д. Гольберг, Г. В. Добрянский – ЦИАМ; Б. Н. Петров, Б. А. Черкасов – МАИ; В. Г. Августинович, Г. И. Гордеев – ППУ; В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков – Институт проблем управления РАН; Ю. М. Гусев, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев, Г. Г. Куликов, Ю. С. Кабальнов, В. Н. Ефанов, В. Г. Крымский, Л. Б. Уразбахтина, А. И. Фрид, В. Ю. Арьков, С. С. Валеев, С. В. Жернаков, О. Д. Лянцев, Р. А. Мунасыпов и др. – УГАТУ.

Несмотря на значительный объем исследований в области построения алгоритмов контроля и диагностики САУ, существующие информационные технологии контроля параметров САУ ГТД и диагностики её функциональных блоков не являются совершенными по ряду причин. С одной стороны, это слабая информационная “увязка”, отсутствие элементов “интеллектуальности”, позволяющих быстро, качественно и эффективно осуществить поддержку

принятия решений и, как следствие, сокращать общее время, затрачиваемое на обслуживание ГТД. С другой стороны, это сложность процессов, протекающих в САУ ГТД, сложность их математического описания, ограниченный состав измеряемых параметров, их технологический разброс и т.д. Указанные факторы приводят к необходимости комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов принятия решений о техническом состоянии САУ ГТД в условиях неопределенности, в том числе с использованием метода контроля по модели FDI (Fault Detection and Identification).

В последние годы как в нашей стране, так и за рубежом большое внимание уделяется разработке и исследованию интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики технического состояния САУ ГТД на основе нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики. В то же время, в силу ряда причин (закрытость работ, узкая специализация решаемых задач и т.д.) в большинстве публикаций не приводятся конкретные инженерные методики, отсутствуют теоретические и практические рекомендации по решению подобных задач, что оставляет широкое поле деятельности для проведения научных исследований в данном направлении.

Таким образом, разработка интеллектуальных алгоритмов автоматического контроля и диагностики систем управления ГТД, а также исследование особенностей их практического применения с учетом ограничений на располагаемые вычислительные ресурсы бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) является актуальной задачей на современном этапе развития авиадвигателестроения.

Объект исследования. Бортовая система автоматического контроля и диагностики САУ ГТД.

Предмет исследования. Методы и алгоритмы автоматического контроля и диагностики технического состояния САУ ГТД и её элементов.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение оперативности и достоверности обнаружения отказов САУ ГТД в условиях изменения режимов работы двигателя на основе разработки интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики систем управления ГТД и методики их программно–аппаратной реализации.

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 архитектуры и структуры нейросетевого многорежимного регулятора с селектированием каналов управления в составе интеллектуальной САУ ГТД.
3. Разработка и исследование интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД на основе нейросетевых моделей.

4. Разработка и исследование алгоритмов обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД на основе мажоритарной схемы резервирования с использованием нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики.

5. Оценка эффективности разработанных интеллектуальных алгоритмов идентификации, контроля и диагностики САУ ГТД и способов их программно–аппаратной реализации на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Методика исследования

При решении поставленных в диссертационной работе задач использованы методы системного анализа, искусственного интеллекта, теории газотурбинных двигателей, теории идентификации, теории автоматического управления, нейроинформатики и нечеткой логики, методов имитационного моделирования сложных систем, объектно–ориентированного программирования.

Результаты, выносимые на защиту

1. Алгоритмы идентификации ГТД и их исполнительных механизмов на основе рекуррентных нейронных сетей.

2. Архитектура и структура нейросетевого многорежимного регулятора ГТД с селективированием каналов управления.

3. Интеллектуальные алгоритмы контроля и диагностики САУ ГТД на основе нейросетевых моделей.

4. Алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД на основе мажоритарной схемы резервирования с использованием нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики.

5. Методика проектирования интеллектуальных алгоритмов идентификации, контроля и диагностики САУ ГТД, а также практические рекомендации по их технической реализации на базе ПЛИС.

Научная новизна результатов

1. Новизна предложенных нейросетевых алгоритмов идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания состоит в использовании новых классов архитектур НС, таких как многослойные и каскадные рекуррентные нейронные сети, и выборе оптимальной структуры и алгоритмов обучения НС, что позволило повысить точность идентификации по сравнению с известными методами с учетом ограничений на вычислительные ресурсы БЦВМ.

2. Новизна предложенного способа построения нейросетевого регулятора с селективированием каналов управления состоит в применении новых классов архитектур НС, включая многослойные и каскадные нейронные сети, и выборе оптимальной структуры и алгоритмов обучения НС, что позволило обеспечить высокое качество процессов управления в широком диапазоне изменения режимов работы двигателя.

3. Новизна предложенных интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД состоит в применении нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики для анализа и распознавания текущего состояния ГТД,

исполнительного механизма системы топливопитания и управляющей части САУ ГТД в режиме реального времени, что позволило повысить эффективность контроля и диагностики элементов системы управления ГТД за счет расширения числа обнаруживаемых отказов.

4. Новизна предложенных интеллектуальных алгоритмов обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД заключается в использовании алгоритмов реконфигурации управляющей части САУ при возникновении отказов, отличающихся тем, что обнаружение отказов в системе осуществляется на основе мажоритарной схемы контроля с использованием нейросетевых моделей элементов САУ и алгоритмов принятия решения на основе нечеткой логики, что позволяет повысить оперативность и достоверность обнаружения отказов.

5. Новизна методики программно–аппаратной реализации интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД на основе ПЛИС Altera заключается в предложенном способе текстово–графического представления нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики, а также программного задания функций активации нейронов, что позволяет повысить оперативность процесса проектирования и сократить требуемые вычислительные ресурсы на реализацию алгоритмов.

Практическая значимость работы

Разработаны алгоритмы и инженерные методики синтеза нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики для решения задач идентификации, контроля и диагностики САУ ГТД, применение которых позволяет повысить оперативность и достоверность обнаружения отказов САУ ГТД в реальном времени. Предложены методические и практические рекомендации по реализации разработанных алгоритмов идентификации, контроля и диагностики элементов САУ ГТД на базе ПЛИС в САПР Quartus, что позволяет автоматизировать основные этапы проектирования и отладки систем с учетом имеющихся ограничений на вычислительные ресурсы БЦВМ.

Апробация работы

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

- IX, XI Международных научных конференциях “Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT)” (Уфа, 2007; Ретимнон, Греция, 2009);
- Международных молодежных научных конференциях “XXXIII–XXXV Гагаринские чтения” (Москва, 2007, 2008, 2009);
- Всероссийских молодежных научных конференциях “Мавлютовские чтения” (Уфа, 2007, 2010, 2011);
- III–VI Всероссийских зимних школах-семинарах аспирантов и молодых ученых “Актуальные проблемы в науке и технике” (Уфа, 2008–2011);
- Российско-немецких семинарах “Инновационные информационные технологии: теория и практика” (Уфа, 2009; Дрезден, Германия, 2010);
- IX Всероссийской научной конференции “Нейрокомпьютеры и их

- применение” (Москва, 2011);
- заседании Башкирского отделения научного совета РАН по методологии искусственного интеллекта (Уфа, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах 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 151 страницах машинописного текста и включает 96 рисунков, 36 таблиц. Библиографический список содержит 155 наименований.

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 современного состояния и тенденций развития систем контроля и диагностики цифровых САУ ГТД. Приводятся требования к авиационным двигателям пятого и шестого поколения (2010–2020 гг.) и их системам автоматического управления (САУ).

Рассмотрена типовая архитектура современной цифровой системы управления и контроля ГТД типа FADEC, в которой при отказе каких-либо элементов информация о неисправности выдается в систему контроля САУ летательного аппарата (ЛА), и выполняется реконфигурация программ управления и структуры электронной части САУ ГТД с целью поддержания работоспособности системы. Рассмотрены примеры реализации систем с подобной архитектурой отечественными и зарубежными фирмами–производителями САУ ГТД.

Отмечается, что современные тенденции развития САУ ГТД направлены на создание распределенных интеллектуальных архитектур FADEC, в которых с помощью мультиплексированного канала информационного обмена (МКИО) осуществляется интеграция различных подсистем САУ ГТД – интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов (ИМ), оснащенных индивидуальной электроникой, двухканального (трехканального) цифрового регулятора, обеспечивающего возможность резервирования устройств ввода (УВв) и вывода (УВыв) информации и управляющих цифровых процессоров (ЦП) (рис. 1).

Рассмотрены способы построения алгоритмов контроля и диагностики цифровых САУ ГТД, а также требования, предъявляемые к ним. Отмечается, что бортовые системы контроля и диагностики в процессе своего развития приобрели способность не только к обнаружению отказавших элементов САУ ГТД, но и к самовосстановлению структуры и функций системы. Развитие бортовых систем контроля и диагностики осуществляется при этом в сторону охвата

контролем как можно большей части системы, а также повышения эффективности, быстродействия, надежности и достоверности контроля.

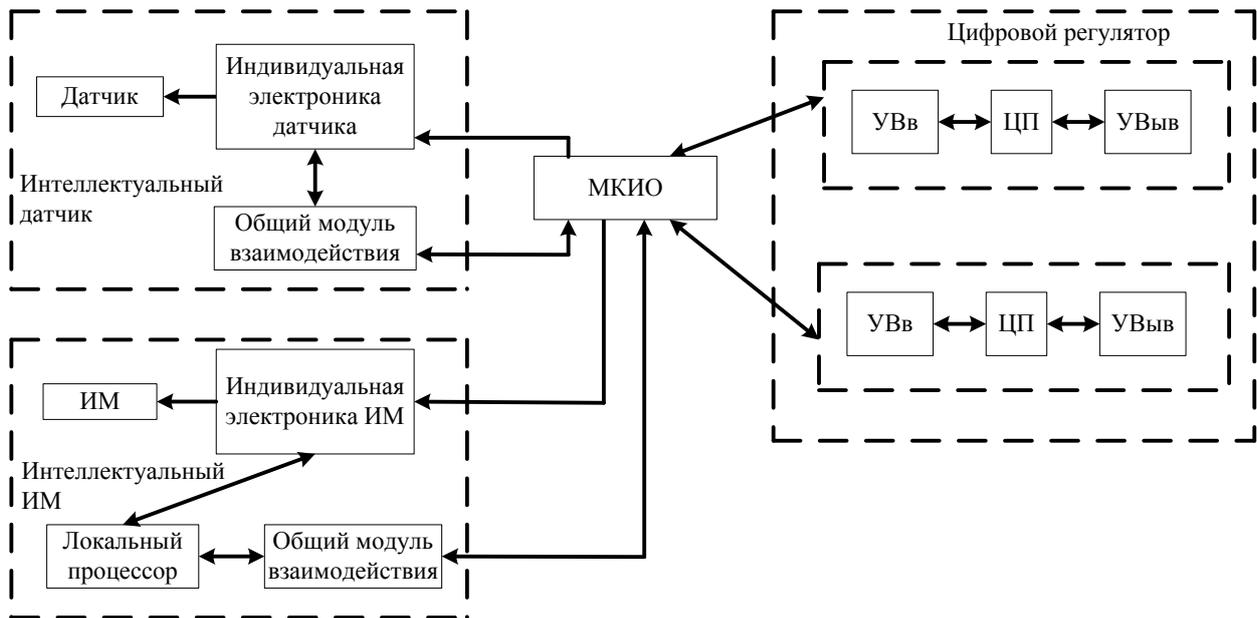


Рисунок 1 – Схема распределенной системы управления ГТД типа FADEC

Современные САУ ГТД, функционирующие в условиях параметрической и структурной неопределенности, требуют применения новых подходов к обеспечению контроля и диагностики. В основе используемого в работе подхода к решению задач контроля и диагностики САУ ГТД применяется метод обнаружения и идентификации отказов по модели FDI (Fault Detection and Identification). Типовая схема реализации данного метода основывается на сравнении результатов измерений характеристик (выходных параметров) объекта контроля (какого-либо элемента/модуля САУ ГТД) с выходами его нейросетевой модели. Реализация метода FDI предполагает решение следующих задач: разработка и программная реализация модели исследуемого объекта контроля (ОК); измерение и анализ текущей величины рассогласования (невязки) между выходами объекта и модели; принятие решения о техническом состоянии ОК.

Функции контроля и диагностики в САУ ГТД разделяются между двумя подсистемами: бортовой системой контроля и диагностики двигателя (БСКД), осуществляющей оперативный контроль работоспособности ГТД, и встроенной системой контроля (ВСК), осуществляющей контроль датчиков, исполнительных механизмов и других элементов управляющей части САУ ГТД. В ВСК, как и в БСКД, за один цикл работы таймера (период выдачи решения) выполняются следующие расчеты: тестовый контроль ВСК (БСКД) (“малый тест”); ввод программ или данных (чисел); контроль работоспособности элементов САУ (или состояния двигателя); вычисление управляющих воздействий (реакций) системы контроля и диагностики.

Рассмотрены перспективы применения интеллектуальных алгоритмов для решения задач контроля и диагностики цифровых САУ ГТД. Под интеллектуальностью понимается способность системы работать с базой внешних событий или ситуаций с целью привлечения некоторых специальных знаний, позволяющих повысить эффективность контроля и диагностики САУ и реализовать соответствующую стратегию управления.

В качестве одного из способов повышения надежности управления двигателем рассматривается возможность применения в САУ встроенных (бортовых) математических моделей, включая модель двигателя, которые можно использовать для оценки текущих параметров ГТД и элементов системы управления с целью построения САУ с полной ответственностью, обеспечивающей высокое качество управления ГТД, в том числе в условиях возможного появления отказов в системе.

Отмечается, что основные тенденции совершенствования систем контроля и диагностики цифровых САУ ГТД связаны с применением интеллектуальных технологий обработки данных (нейронных сетей, алгоритмов нечеткой логики), исследование и внедрение которых представляет собой актуальную задачу на современном этапе развития авиадвигателестроения.

Проведен анализ возможностей применения различной элементной базы для реализации перспективных алгоритмов контроля и диагностики в составе ВСК и БСКД. Отмечаются преимущества применения для этих целей программируемых логических интегральных схем получивших широкое распространение как в отечественных, так и в зарубежных системах управления авиационной техникой.

Формулируются цель исследования и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во второй главе рассматривается задача идентификации ГТД и его исполнительного механизма (ИМ), исследуются возможные способы построения нейросетевого многорежимного регулятора ГТД с селективированием каналов управления, а также нейросетевого классификатора (блока принятия решений) в системе контроля и диагностики ГТД.

Анализируются различные архитектуры рекуррентных НС в классе многослойных (newff), каскадных НС (newcf) и сетей Элмана (newelm), а также различные алгоритмы обучения этих сетей – Байесовский алгоритм обучения (trainbr), алгоритм обучения с циклическим представлением входа (trainc), алгоритм обучения Левенберга–Марквордта (trainlm) и др. Проведен сопоставительный анализ различных функций активации нейронов – логистическая сигмоида (logsig), тангенциальная сигмоида (tansig), рациональная сигмоида (ratsig), кусочно–линейная функция активации (pwlinear).

Разработаны алгоритмы идентификации ГТД на основе указанных классов рекуррентных нейронных сетей и выбора оптимальных алгоритмов обучения НС на основе регуляризации с целью повышения точности

НС–моделей ГТД. Показано в частности, что наилучшее качество идентификации ГТД в рассмотренных примерах обеспечивает рекуррентная каскадная НС (рис. 2) с 8 нейронами в скрытом слое, обученная с использованием алгоритма Левенберга–Маркуордта.

На рис. 2 соответственно n_1 и n_2 – частоты вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления; T_4^* – температура заторможенного потока газов за турбиной; ΔP_k^* – степень изменения давления на компрессоре; G_T – расход топлива в камеру сгорания ГТД; Z^{-1} – оператор временной задержки сигналов на один такт.

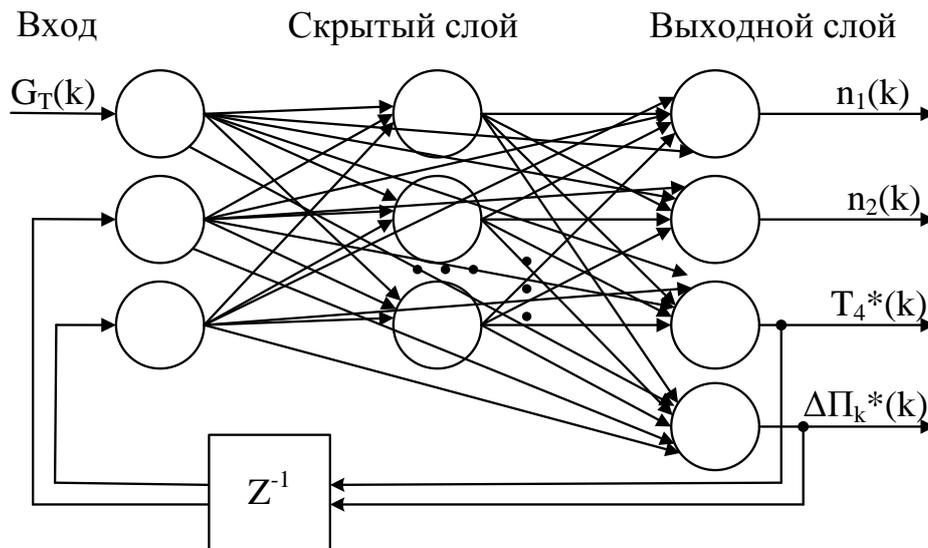


Рисунок 2 – Архитектура НС-модели ГТД на основе рекуррентной каскадной НС

Показано, что применение предложенных подходов позволило решить задачу идентификации ГТД на переходных режимах с относительной приведенной погрешностью, равной $\delta n_1 = 0,49 \%$, $\delta n_2 = 0,51 \%$, $\delta \Delta P_k^* = 0,63 \%$, $\delta T_4^* = 0,11 \%$, и на установившихся режимах с погрешностью $\delta n_1 = 0,37 \%$, $\delta n_2 = 0,4 \%$, $\delta \Delta P_k^* = 0,48 \%$, $\delta T_4^* = 0,03 \%$. График изменения нормированных значений параметров ГТД во времени, составляющих обучающую выборку при построении НС-модели двигателя, показан на рис. 3.

Разработана методика идентификации НС–модели исполнительного механизма (дозатора топлива), включающая в себя этапы выбора оптимальной архитектуры и структуры НС, алгоритмов обучения НС, функции активации нейронов. Показано, что выбранная архитектура (каскадная НС) и структура НС (6 нейронов в скрытом слое, функция активации – рациональная сигмоида) позволяет решить задачу идентификации ИМ с относительной приведенной погрешностью, равной $0,53 \%$.

Предложены архитектура и структура нейросетевого многорежимного регулятора ГТД с селективированием каналов управления в составе интеллектуальной САУ ГТД. Разработана методика синтеза НС–регулятора, в

результате применения которой средняя квадратическая ошибка (СКО) управления составила на переходных режимах $\Delta n_1 = 0,25 \%$, $\Delta n_2 = 0,37 \%$, $\Delta T_k^* = 0,39 \%$, $\Delta T_4^* = 0,62 \%$.

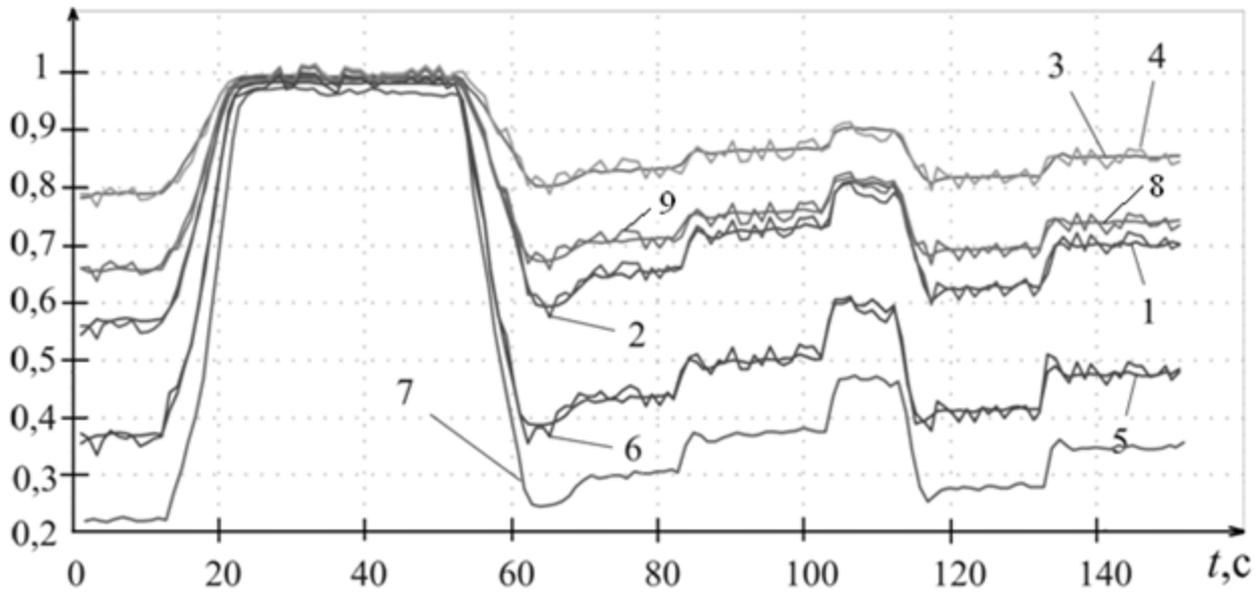


Рисунок 3 – Результаты моделирования каскадной НС–модели ГТД: 1 – выход НС по n_1 ; 3 – выход НС по n_2 ; 5 – выход НС по T_4^* ; 9 – выход НС по ΔP_k^* ; 2,4,6,8 – соответственно реальные данные по $n_1, n_2, T_4^*, \Delta P_k^*$; 7 – входные данные по G_T

Предложена методика построения НС-классификатора (т.е. блока принятия решений на основе метода FDI) (рис. 4), позволяющая в зависимости от количества входов (невязок), количества выходов и количества классов возможных отказов определить минимальное число нейронов в скрытом слое НС.



Рисунок 4 – Схема реализации метода FDI

На рис. 4: $U_1 \dots U_n$ – компоненты вектора управляющих (входных) воздействий; $Y_{M1} \dots Y_{Mn}$ – компоненты вектора выходов НС–модели объекта контроля (ОК), под которым может пониматься ИМ, цифровой регулятор или какая-либо отдельная подсистема САУ ГТД; $Y_{OK1} \dots Y_{OKn}$ – компоненты вектора

выходных параметров ОК; $\Delta_1 \dots \Delta_n$ – невязки, т.е. разности векторов выходов ОК и НС, на основе анализа которых происходит распознавание состояния ОК в текущий момент времени и принятие решения о принадлежности этого состояния тому или иному классу ($F_1 \dots F_N$ – компоненты вектора выходов НС–классификатора).

Приведены результаты проектирования НС–классификатора на основе каскадной НС. Показано, что разработанный НС–классификатор имеет достаточно универсальную сферу применения и способен распознавать различные типы отказов элементов САУ ГТД: короткое замыкание, обрыв, параметрический отказ, наводки сигналов.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы обеспечения отказоустойчивости управляющей части САУ ГТД при возникновении отказов с использованием дополнительных нейросетевых моделей элементов канала управления и нечеткой логики для анализа и распознавания текущего состояния ГТД, ИМ и управляющей части САУ ГТД.

Предложенная схема обеспечения отказоустойчивости двухканальной САУ ГТД типа FADEC включает в себя НС–классификатор, который обеспечивает своевременное распознавание отказов датчиков, ИМ и цифрового регулятора (ЦР), и логический блок, формирующий управляющее воздействие на изменение структуры САУ ГТД. В качестве оптимальной архитектуры НС–классификатора выбрана рекуррентная каскадная НС, имеющая 15 нейронов в скрытом слое, в качестве функции активации нейронов используется рациональная сигмоида, в качестве алгоритма обучения НС – алгоритм Левенберга–Маркуордта.

Результаты проведенного исследования подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов диагностики отказов и обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД при отказах элементов управляющей части САУ.

Предложена схема построения трехканальной САУ типа FADEC, в которой нейронные сети НС₁, НС₂ и первый интеллектуальный контроллер (ИК₁), реализованный на основе нечеткой логики, обеспечивают контроль и диагностику состояния цифрового регулятора, нейронные сети НС₃, НС₄ и второй интеллектуальный контроллер (ИК₂), также построенный на основе нечеткой логики, решают задачи контроля и диагностики ГТД, ИМ и датчиков; БСКД – бортовая система контроля и диагностики двигателя; ГИМ – резервный гидромеханический ИМ (рис. 5).

Интеллектуальные контроллеры ИК₁ и ИК₂ проектируются на основе алгоритмов нечеткого вывода и, в случае отказа модулей, реализующих соответствующие нейронные сети, выдают команду на их отключение или переобучение. При этом учитывается тот факт, что нейронные сети, как правило, являются функционально избыточными. В случае отказа единичного нейрона (при аппаратной реализации НС) либо при обрыве синаптической связи нейрона, сохраняется возможность дообучения НС с минимальной потерей качества функционирования данной сети.

двигателя; $\Delta_1 = Y - Y_{НС1}$, $\Delta_2 = Y - Y_{НС2}$, $\Delta_3 = Y_{НС1} - Y_{НС2}$ – векторы рассогласований (невязок) между значениями векторов сигналов Y , $Y_{НС1}$, $Y_{НС2}$.

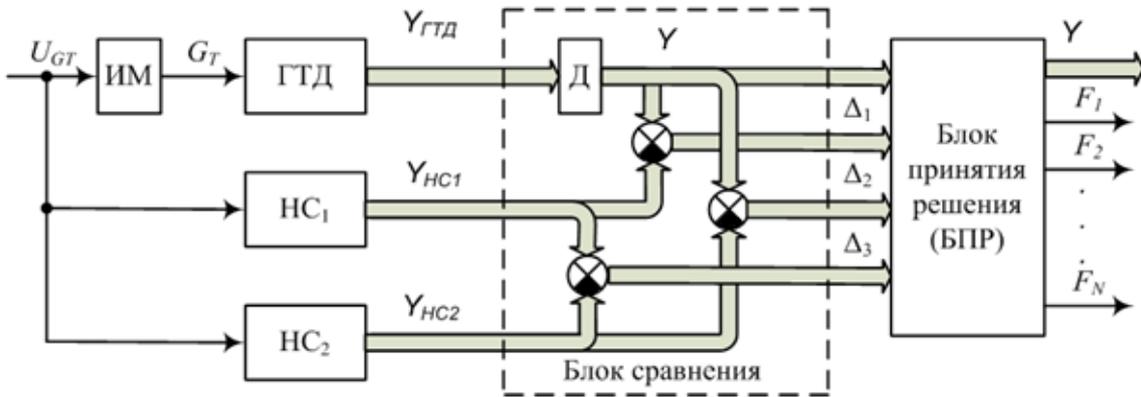


Рисунок 6 – Контроль и диагностика элементов канала управления ГТД

Интеллектуальный контроллер ИК₂ представляет собой блок принятия решений на основе нечеткой логики. БПР реализован с помощью пакета Fuzzy Logic Toolbox в рамках среды MatLab с интегрированием результатов в среду моделирования Simulink. Спроектированный блок нечеткой логики обеспечивает отказоустойчивость САУ, позволяя классифицировать отказ ЦР, НС–моделей регуляторов или исправное состояние системы.

В целом, применение алгоритмов контроля и диагностики на основе нечеткой логики с использованием предложенной схемы голосования “два из трех” значительно повышает отказоустойчивость САУ, позволяя парировать отказы датчиков и отказы нейронных сетей.

В четвертой главе рассмотрены вопросы программно–аппаратной реализации разработанных интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД.

Проведен анализ возможных подходов к реализации алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД на основе нейросетевых моделей и нечеткой логики, который показал, что для реализации предложенных подходов в наибольшей степени удовлетворяет применение ПЛИС. Разработана методика программно–аппаратной реализации на базе ПЛИС разработанных алгоритмов контроля и диагностики САУ ГТД на основе мажоритарной схемы голосования.

Рассмотрено несколько вариантов реализации многовходовых нейронов на основе блоков умножения, сложения и вычисления активационной функции. Данные блоки создаются в символьном редакторе (Symbol Editor), который позволяет редактировать существующие символы и создавать новые.

Проведено сравнение различных вариантов реализации нейронов по критерию минимизации числа занятых логических ячеек. Показано, что использование библиотечных LPM (Library of Parameterized Modules)–макрофункций позволяет значительно снизить количество используемых логических элементов при реализации блоков умножения. Спроектированный НС–регулятор содержит 6 нейронов, которые занимают 46 % логических

элементов ПЛИС (2776 логических ячеек), 84 % выводов (156 пинов) ПЛИС. Суммарная квадратическая ошибка вычисления параметров ГТД с помощью нейросетевых моделей на базе ПЛИС EP1C20F400C8 семейства Cyclone фирмы Altera составила около 1,61 %.

Рассмотрена задача проектирования НС–модели ГТД и ИМ на базе ПЛИС и проведено сравнение результатов работы двух нейронных сетей: НС–модели ГТД, реализованной программно, и НС–модели, реализованной на ПЛИС. Суммарная квадратическая ошибка вычисления параметров ГТД с помощью НС-модели на тестовой последовательности данных составила соответственно: $\Delta n_1 = 1,98 \%$, $\Delta n_2 = 1,49 \%$, $\Delta T_4^* = 1,61 \%$. Время вычисления выходных параметров ГТД для заданного значения G_T составило 153 нс. Для ИМ суммарная квадратическая ошибка выхода НС-модели составила $\Delta G_T^* = 1,54 \%$.

Рассмотрена программно-аппаратная реализация алгоритмов контроля и диагностики отказов элементов канала управления ГТД на базе ПЛИС Altera.

Схема блока нечеткого управления и контроля включает в себя: блок принятия решений, 3 элемента `lpm_add_sub` (сумматор), 3 `lpm_dividate` (делитель), `lpm_constant` (для хранения константы), 3 `lpm_mux` (мультиплексора). На основе выявляемых отказов мультиплексор решает, какой сигнал пропустить на выход. Если имеет место отказ какого–либо датчика, то на выход схемы выдается среднее арифметическое соответствующих выходов нейронных сетей. Блок нечеткого управления и контроля занимает 452 логические ячейки ПЛИС и 104 вывода (пина) ПЛИС на основе микросхемы Altera Cyclone EP1C12Q240C8.

Проведено сравнение результатов работы двух схем контроля и диагностики отказов элементов канала управления ГТД: схемы контроля и диагностики отказов элементов канала управления ГТД, реализованной программно в среде Matlab, и схемы контроля и диагностики отказов элементов канала управления ГТД, реализованной на ПЛИС. Относительная приведенная погрешность вычисления параметров ГТД с помощью НС–модели на тестовой последовательности данных составила соответственно $\delta n_1 = 0,56 \%$, $\delta n_2 = 0,61 \%$, $\delta T_4^* = 0,53 \%$.

Проведено сравнение характеристик разработанной НС-модели ГТД с реализацией данной модели на базе специализированного нейрочипа L1879VM1 и цифрового сигнального процессора ST10F269. Выявлены следующие достоинства реализации НС–модели ГТД на базе ПЛИС: высокая точность вычислений, наличие блоков LPM для их программно–аппаратной реализации. При этом тактовая частота работы спроектированной НС–модели ГТД на базе ПЛИС более чем в 20 раз быстрее по сравнению со специализированным процессором L1879VM1 и в 120 раз быстрее вычислителя ST10F269 на базе STG Thompson.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны нейросетевые алгоритмы идентификации ГТД и исполнительного механизма системы топливопитания, основанные на использовании новых классов архитектур НС (таких как многослойные и каскадные рекуррентные нейронные сети), выборе оптимальной структуры и алгоритмов обучения НС, что позволило повысить на 15–18 % точность идентификации ГТД и ИМ по сравнению с известными методами с учетом ограничений на вычислительные ресурсы БЦВМ.

2. Предложены архитектура и структура нейросетевого многорежимного регулятора ГТД с селективированием каналов управления, основанные на применении новых классов архитектур НС (таких как многослойные и каскадные нейронные сети), что позволяет обеспечить высокое качество процессов управления в широком диапазоне изменения режимов работы двигателя.

3. Разработаны интеллектуальные алгоритмы контроля и диагностики текущего состояния ГТД, исполнительного механизма системы топливопитания и управляющей части САУ ГТД, основанные на применении метода FDI, базирующегося на анализе вектора невязок между выходами объекта контроля и его нейросетевой модели с помощью нейросетевого классификатора, что позволяет повысить оперативность и достоверность контроля и диагностики элементов САУ ГТД.

4. Разработаны алгоритмы обеспечения отказоустойчивости САУ ГТД, основанные на применении мажоритарной схемы контроля текущего состояния и резервирования элементов САУ ГТД с использованием нейросетевых моделей и блока принятия решений на основе нечеткой логики, что позволяет повысить оперативность и достоверность обнаружения отказов в широком диапазоне изменения режимов работы и характеристик ГТД.

5. Разработаны процедура и методика программно–аппаратной реализации нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики, реализующих предложенные алгоритмы контроля и диагностики САУ ГТД на основе ПЛИС Altera, основанные на текстово–графическом способе представления нейросетевых моделей и алгоритмов нечеткой логики, а также программном способе задания функций активаций нейронов. Рассмотрены конкретные особенности реализации данной методики с учетом существующих требований к элементной базе и ограничений на вычислительные ресурсы БЦВМ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Вопросы синтеза и технической реализации нейросетевых алгоритмов управления газотурбинным двигателем / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2010. № 5. С. 44–52.
2. Нейросетевые технологии в задачах управления и контроля авиационных двигателей / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 1.1 (43). С. 122–126.
3. Синтез и программно–аппаратная реализация нейросетевой системы управления ГТД с селектированием каналов / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 9. С. 72–78.

В других изданиях

4. Методика проектирования нейросетевых структур на основе технологии ПЛИС / Макаров А.С. // XXXIII Гагаринские чтения: материалы Междунар. молодежн. науч. конф.–М.: МАТИ, 2007. Т. 4. С. 90–91.
5. Методы проектирования НС–алгоритмов на базе CPLD / В. И. Васильев, А. С. Макаров // CSIT'2007: тр. 9–го междунар. сем. по компьют. наукам и информац. технологиям. Красноустьевск, Уфа, 2007. С. 70–76. (Статья на англ. яз.).
6. О некоторых вопросах проектирования нейронной сети на основе технологии ПЛИС / А. С. Макаров // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр. третьей Всерос. зимн. шк.–сем. аспирантов и молодых ученых, Уфа: Диалог, 2008. Т. 1. – С. 347–351.
7. Оптимизация проектирования нейросетевых алгоритмов на основе технологии ПЛИС / А. С. Макаров // XXXIV Гагаринские чтения: материалы Междунар. молодежн. науч. конф.–М.: МАТИ, 2008. Т. 4. С. 40–41.
8. Аппаратная реализация НС–алгоритмов на основе ПЛИС / А. С. Макаров // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр. четвертой Всерос. зимн. шк.–сем. аспирантов и молодых ученых, Уфа: Диалог, 2009. Т. 1. С. 345–349.
9. Построение нейросетевых структур на ПЛИС Altera / А. С. Макаров // XXXV Гагаринские чтения: материалы Междунар. молодежн. науч. конф.–М.: МАТИ, 2009. Т. 4. С. 56–57.
10. Нейросетевые технологии проектирования систем управления авиадвигателем / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Инновационные информационные технологии: труды российско–немецкого сем. Уфа, 2009. С. 72–77. (Статья на англ. яз.).
11. Проектирование перспективной нейросетевой системы управления ГТД / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // CSIT'2009: тр. 11–го

междунар. сем. по компьют. наукам и информац. технологиям. Крит, Греция, 2009. С. 13–18. (Статья на англ. яз.).

12. Проектирование и техническая реализация интеллектуальных систем управления авиационными газотурбинными двигателями / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, И. А. Каримов, А. С. Макаров // Интеллектуальные системы управления/ Под. ред. акад. С. Н. Васильева. – М.: Машиностроение, 2010. С. 142–153.

13. Нейросетевые алгоритмы управления газотурбинным двигателем и их реализация на ПЛИС / В. И. Васильев, И. И. Идрисов, А. С. Макаров // Инновационные информационные технологии: труды российско–немецкого сем. Дрезден, Германия, 2010. С. 138–143. (Статья на англ. яз.).

14. Анализ сложности и формирование требований к аппаратной реализации НС на базе ПЛИС / А. С. Макаров // Мавлютовские чтения: Всерос. молодёжн. науч. конф., Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 1. С. 35–37.

15. Реализация НС–модели исполнительного механизма на базе ПЛИС / А. С. Макаров // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр. пятой Всерос. зимн. shk.–сем. аспирантов и молодых ученых, Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 2. С. 241–244.

16. Программно–аппаратная реализация управляющей части САУ ГТД в САПР Altera Quartus / А. С. Макаров // Мавлютовские чтения: Всерос. молодёжн. науч. конф., Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 3. С. 166–168.

17. Задача обеспечения отказоустойчивости нейросетевых алгоритмов управления и контроля / А. С. Макаров // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. тр. шестой Всерос. зимн. shk.–сем. аспирантов и молодых ученых., Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 1. С. 185–189.

Диссертант

А. С. Макаров

МАКАРОВ Андрей Сергеевич

АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМИ ГТД
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ
И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «14» ноября 2011 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 2,0. Усл. кр.-отт. 2,0 Уч.-изд. 2,0
Тираж 100 экз. Заказ № 364

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный
авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12