

На правах рукописи

МУСЛУХОВ Ильдар Ирекович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БОРТОВЫХ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ГТД НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**Специальность 05.13.01 — Системный анализ, управление
и обработка информации**

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

Уфа 2007

Работа выполнена
на кафедре вычислительной техники и защиты информации
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. ЖЕРНАКОВ Сергей Владимирович
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. АСАНОВ Асхат Замилович канд. техн. наук, доцент КРУЖКОВ Вячеслав Николаевич
Ведущая организация	ФГУП УНПП «Молния», г.Уфа

Защита состоится 26 декабря 2007 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, Уфа - центр, ул. К.Маркса 12, УГАТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 23 ноября 2007 г.

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

В.В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работа

Развитие современной авиационной транспортной системы привело к повышению нагрузки на авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) и на его основные узлы, что негативно сказалось на безопасности полетов. В условиях повышенной нагрузки на узлы и агрегаты ГТД повышение безопасности его функционирования достигается на основе использования стратегии управления эксплуатацией по фактическому техническому состоянию. Это предполагает использование наряду с классическими подходами и новых интеллектуальных методов, позволяющих эффективно и качественно осуществлять процесс контроля параметров авиационного двигателя, с учетом так называемых «не-факторов»: неполноты измеряемой информации, шумов измерений, наличия конструктивной, параметрической и экспертной неопределенности при оценке параметров ГТД. Основу управления эксплуатацией современного ГТД составляет подчинение целей функционирования его бортовых информационных технологий контроля и управления эксплуатацией целям функционирования ГТД, определяющим правила и порядок обработки комплексной информации в соответствии с условиями эксплуатации. В настоящее время повышение эксплуатационной нагрузки на ГТД приводит к сокращению времени на его обслуживание, т.е. на контроль и диагностику технического состояния, что требует использования оперативных и эффективных методов контроля, базирующихся на комплексной автоматизации и интеллектуализации этих процессов. Эффективность контроля состояния авиационного двигателя существенно зависит от вероятности правильного распознавания его технического состояния, которая непосредственно влияет на качество систем управления эксплуатацией ГТД, что в конечном итоге определяет экономичность и безопасность полетов.

Создание информационных технологий контроля технического состояния ГТД является процессом, предполагающим определенную методологию использования априорной информации об объекте, измерительных и вычислительных средствах, образующих ресурсы информационных технологий контроля и разнообразные методы решения задач обработки, оценки измерительной информации и принятия решений для достижения целей контроля и управления ГТД. Проблемам создания информационных технологий контроля и управления эксплуатацией сложных технических объектов посвящены работы: Л.И. Волкова, Г.И. Братухина, Е.В. Барзиловича, Ю.М. Гусева, Б.Г. Ильясова, В.А. Острейковского, В.В. Смирнова, Р.М. Юсупова, А.З. Асанова и др. Проблемы контроля технического состояния ГТД исследуются в работах В.Г. Августиновича, В.Т. Дедеша, В.И. Васильева, В.Н. Ефанова, Ю.С. Кабальнова, В.Г. Крымского, Г.Г. Куликова и др. Теоретические основы создания математических моделей ГТД и его узлов рассматриваются в работах Г.Н. Добрянского, О.С. Гуревича, Р.К. Чуяна и др.

Вместе с тем, несмотря на значительный объем исследований в данной области, информационные технологии контроля параметров ГТД не являются совершенными по ряду причин: с одной стороны слабая информационная “увязка”, отсутствие элементов “интеллектуальности”, позволяющих быстро, качественно и эффективно осуществлять поддержку принятия ответственных решений и, как следствие, сокращать общее время, затрачиваемое на обслуживание ГТД; с другой, нестационарность физических процессов в авиационном двигателе, сложность их математического описания, зависимость его технических характеристик от внешних условий работы, ограниченный состав измеряемых параметров, их технологический разброс и т.д. Указанные факторы приводят к необходимости автоматизации процессов принятия решений о техническом состоянии двигателя в условиях неопределенности.

Основными направлениями, определяющими повышение эффективности бортовых информационных технологий контроля состояния ГТД, следует считать интеллектуализацию процессов обработки информации с привлечением нейросетевых методов, которые способны обеспечить повышение качества бортовых алгоритмов контроля параметров ГТД при действии указанных выше неопределенных факторов. Таким образом, создание бортовых информационных технологий контроля параметров ГТД включает в себя разработку метода, методики, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющих повысить эффективность решения задач контроля и управления эксплуатацией ГТД.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, посвященная повышению эффективности бортовых алгоритмов контроля параметров ГТД на основе технологии нейронных сетей, является актуальной.

Цель работы

Повышение эффективности бортовых алгоритмов контроля параметров ГТД на основе технологии нейронных сетей.

Задачи исследования

Для достижения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка комплекса системных моделей процесса контроля измеряемых параметров ГТД в бортовых условиях.
2. Разработка методики идентификации НС-моделей ГТД.
3. Разработка алгоритмов определения отказов измерительных каналов и восстановления значений параметров на основе НС-моделей ГТД.
4. Модификация алгоритма обучения НС-моделей ГТД и алгоритма адаптации этих моделей, для контроля индивидуальных параметров авиационного двигателя.
5. Разработка программного обеспечения, реализующего методику идентификации НС-моделей ГТД.

Методы исследования

Поставленные в диссертационной работе задачи решались с использованием методов системного анализа, теории воздушно-реактивных двигателей, теории идентификации, теории вероятностей и математической статистики, нейроинформатики, теории планирования эксперимента, имитационного моделирования, теории информационных систем и обработки данных, объектно-ориентированного программирования.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Системные модели процесса проектирования и функционирования БКИП ГТД.
2. Методика идентификации бортовых НС-моделей ГТД.
3. Алгоритмы определения отказов измерительных каналов и восстановления значений параметров.
4. Модифицированный алгоритм обучения нейронных сетей Левенберга - Марквардта, требующий меньшего объема оперативной памяти и времени на его реализацию, а также алгоритм адаптации НС-моделей ГТД в бортовых условиях.
5. Разработанное программное обеспечение, реализующее методику идентификации бортовых НС-моделей ГТД, а также исследовательский прототип бортовой интеллектуальной системы контроля параметров ГТД «Борт-Нейро».

Научная новизна результатов

1. На основании SADT-методологии и IDEF-технологий разработан комплекс системных моделей процесса контроля параметров ГТД, что позволило выделить основной спектр функциональных задач и обоснованно сформировать требования к их реализации в составе бортовой нейросетевой системы контроля параметров.
2. Разработана методика идентификации бортовых моделей ГТД, на основе нейросетевых технологий, позволяющая идентифицировать НС-модели ГТД в условиях неполноты измеренной информации.
3. Разработаны алгоритмы определения отказов измерительных каналов на основе бортовых нейросетевых моделей ГТД, позволяющий эффективно и качественно осуществлять локализацию отказов, и восстановления значений параметров с отказавших измерительных каналов, позволяющий эффективно и качественно восстанавливать потерянную информацию.
4. Алгоритмы обучения нейронных сетей Левенберга – Марквардта, на основе использования теории параллельных вычислений и линейной алгебры, позволяющий увеличить скорость обучения на 24% и сократить объем ОЗУ в два раза и адаптации моделей ГТД, на основе технологии нейронных сетей, позволяющий осуществлять коррекцию НС-моделей ГТД с учетом индивидуальных характеристик конкретного ГТД.
5. Разработаны нейросетевые модули, зарегистрированные в РосАПО, для решения задач контроля параметров ГТД, интегрированные в составе

исследовательского прототипа бортовой нейросетевой системы контроля параметров «Борт-Нейро», применение которых позволяет повысить эффективность контроля параметров ГТД.

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность комплекса системных моделей процесса контроля параметров ГТД подтверждается корректностью формализации и обоснованностью требований к выбору соответствующих методов, алгоритмов и их реализации в рамках SADT – методологии и IDEF – технологий.

Обоснованность и достоверность разработанных нейросетевых алгоритмов подтверждается результатами моделирования и решения практической задачи бортового контроля параметров ГТД, а также их использованием в составе исследовательского прототипа бортовой нейросетевой системы контроля параметров «Борт-Нейро». Достоверность основных результатов работы подтверждена решением широкого спектра практических задач и внедрением этих результатов в ФГУП УНПП «Молния».

Практическая значимость результатов

Практическая ценность результатов, полученных в диссертации, заключается в разработке:

1. Комплекса системных моделей процесса контроля параметров ГТД, позволяющий выделить основной спектр функциональных задач и обоснованно сформировать требования к их реализации в составе бортовой нейросетевой системы контроля параметров.

2. Методики идентификации бортовых моделей ГТД, на основе нейросетевых технологий, позволяющая идентифицировать НС-модели ГТД в условиях неполноты измеренной информации.

3. Алгоритма определения отказов измерительных каналов на основе бортовых нейросетевых алгоритмов, позволяющий эффективно и качественно осуществлять локализацию отказов; алгоритма восстановления значений параметров авиационного двигателя на основе адекватных НС-моделей, позволяющий эффективно и качественно восстанавливать потерянную информацию.

4. Модифицированного алгоритма обучения нейронных сетей Левенберга – Марквардта, позволяющий увеличить скорость обучения на 24% и сократить объем ОЗУ в два раза, а также бортовой алгоритм адаптации НС-моделей ГТД, позволяющий осуществлять коррекцию НС-моделей ГТД с учетом индивидуальных характеристик конкретного ГТД.

5. Нейросетевых модулей, зарегистрированных в РОСАПО, для решения задач контроля параметров ГТД, интегрированные в составе исследовательского прототипа бортовой нейросетевой системы контроля параметров «Борт-Нейро», применение которых позволяет повысить эффективность контроля параметров ГТД

Результаты работы в виде алгоритмов, методик и программного обеспечения внедрены в ФГУП УНПП «Молния» и в учебный процесс кафедры ВТ и ЗИ УГАТУ.

Апробация работы

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», Уфа, 2003; Вторая всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Мехатроника, Автоматизация, Управление», Уфа, 2005; Федеральная итоговая научно-техническая конференция творческой молодежи России, Москва, 2003; Студенческие научно-технические конференции, УГАТУ, Уфа, 2001-2007 г.

Публикации

Основные положения и результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 20 работах, включая 1 статью в рецензируемом журнале из списка ВАК РФ, 16 публикаций в центральных журналах, материалах Всероссийских и Международных конференций, 3 свидетельства о регистрации программного обеспечения в РосАПО.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения, приложений, библиографического списка и изложена на 161 страницах. Библиографический список содержит 122 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обсуждается актуальность темы исследования, формулируется цель и задачи исследования, приводятся результаты, выносимые на защиту, отмечается их новизна и практическая значимость, приводятся сведения о реализации работы, ее апробации и публикациях.

В первой главе проводится анализ современного состояния задачи контроля измеряемых параметров ГТД в бортовых системах контроля технического состояния ГТД, рассматривается аппаратная реализация таких систем. Приводится классификация отказов информационных каналов, при которых уменьшается точность измерения параметров. Обоснована необходимость повышения эффективности контроля измеряемых параметров ГТД в бортовых условиях, которая осуществляется на основе использования аппаратного и алгоритмического подходов.

Рассматриваются достоинства и недостатки каждого подхода. Сравнительный анализ методов в условиях бортовой реализации показывает преимущества использования алгоритмического подхода на основе эталонной математической модели (ММ) ГТД. Предлагается функциональная схема системы контроля, диагностики и управления ГТД на базе предложенного алгоритмического подхода для повышения эффективности бортовых алгоритмов контроля измеряемых параметров ГТД (рис. 1). Показана необходимость

использования разрабатываемого бортового алгоритмического решения задачи контроля измеряемых параметров ГТД. Анализируются существующие микропроцессорные решения для реализации блока контроля измеряемых параметров ГТД.

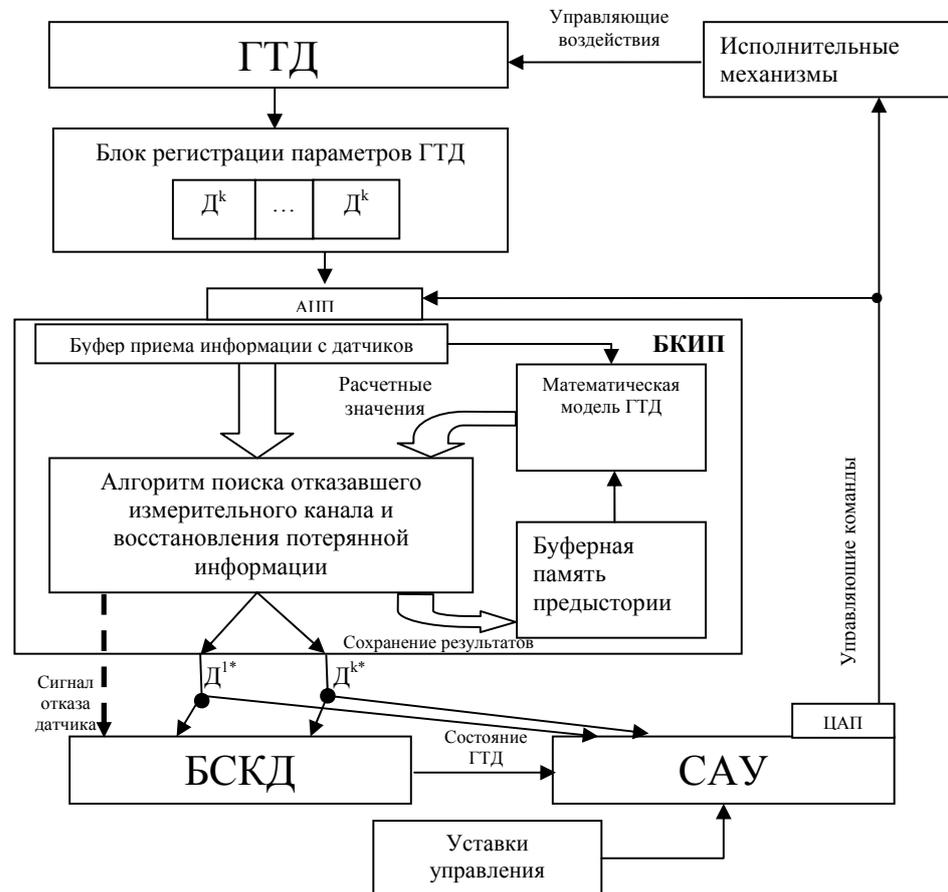


Рисунок 1. Функциональная схема блока контроля измеряемых параметров ГТД

Проводится анализ существующих подходов, методов, методик и алгоритмов идентификации математической модели ГТД (метод наименьших квадратов (МНК), кубические сплайны (КС), Марковские стохастические модели (МСМ), быстросчетные кусочно-линейные динамические модели (БКЛДМ), полная поэлементная математическая модели (ППММ)), оценивается возможность их применения в существующих аппаратных реализациях системы контроля параметров ГТД. Результаты сравнительного анализа, рассмотренных выше методов сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики методов построения упрощенных моделей ГТД

Параметр Модель ГТД	Погрешность аппроксимации, %	Погрешность аппроксимации с шумом (1%), %	Требуемый объем памяти, Кб	Время реализации на ST10F269, мс
Полином (МНК)	2,53	19,45	7	1,15
Кубический сплайн (КС)	0,89	0,95	200	1,75
БКЛДМ	1	12	126	1
ППММ	0,1	0,1	15000	80000
МСМ	1-1,5	-	56000	1,25

Установлено, что основным недостатком существующих методов построения математических моделей ГТД являются высокая сложность их реализации в рамках существующих бортовых вычислителей и в связи с этим необходимость ее полного пересчета (в случае адаптации к изменившимся параметрам ГТД и окружающей среды), что затрудняет их использование в бортовых условиях. Проведенный анализ показывает, что в условиях бортовой реализации задачу идентификации бортовой ММ ГТД необходимо решать, используя интеллектуальные методы, базирующиеся на основе нейросетевых технологий.

Во второй главе рассматриваются вопросы применения системного подхода к решению задачи информационного контроля состояния авиационного двигателя. Подчеркивается важность и роль системного моделирования для процессов проектирования и функционирования перспективного бортового блока контроля измеряемых параметров (БКИП) ГТД.

В качестве базовой методологии для решения задач системного моделирования используется SADT (Structured Analysis and Design Technique) – методология и поддерживающие ее IDEF-технологии.

Показано, что применение методологии системного моделирования на этапе проектирования бортовых интеллектуальных систем контроля измеряемых параметров ГТД позволяет обосновать и сформулировать требования к перспективным бортовым интеллектуальным системам контроля состояния авиационного двигателя, определить состав и взаимосвязь отдельных компонент для их реализации в виде исследовательского прототипа.

В рамках методологии системного моделирования:

- разработан комплекс функциональных моделей IDEF0 процесса контроля измеряемых параметров ГТД, что позволило выделить основные функции и спектр решаемых задач в составе бортовой интеллектуальной системы контроля технического состояния авиационного двигателя;
- разработан комплекс информационных моделей IDEF/1X процесса контроля измеряемых параметров авиационного двигателя, что позволило

определить логическую структуру и механизмы взаимодействия информационных потоков в составе бортовой интеллектуальной системы контроля технического состояния авиационного двигателя;

- построена динамическая модель процесса контроля измеряемых параметров авиационного двигателя, что позволило формализовать требования к механизму логического вывода в процессе выполнения бортовой интеллектуальной системой функции контроля измеряемых параметров.

В третьей главе в рамках предложенной функциональной схемы БКИП ГТД на основе эталонной НС-модели ГТД разрабатываются: метод идентификации бортовых НС-моделей и АНС для БКИП ГТД, алгоритм обнаружения отказов датчиков и восстановления потерянной информации с отказавшего датчика.

Проведен сравнительный анализ эффективности использования различных архитектур нейронных сетей для решения задач идентификации ММ ГТД в условиях бортовой реализации. Установлено что использование НС-моделей позволяет повысить эффективность контроля измеряемых параметров авиационного двигателя. В качестве НС-моделей кандидатов рассматриваются рекуррентные нейронные сети следующих архитектур: НС прямого распространения сигнала с одним скрытым слоем с общей обратной связью (рис. 2, а) и рекуррентной НС Эльмана (рис. 2, б).

Исследуемые НС-модели различались следующими параметрами: количеством нейронов в скрытом слое и их передаточными функциями; наличием дополнительных общих обратных связей или глубиной общей обратной связи. В качестве передаточных функций рассматривались: линейная, сигмоида и гиперболический тангенс (формулы 1 – 3).

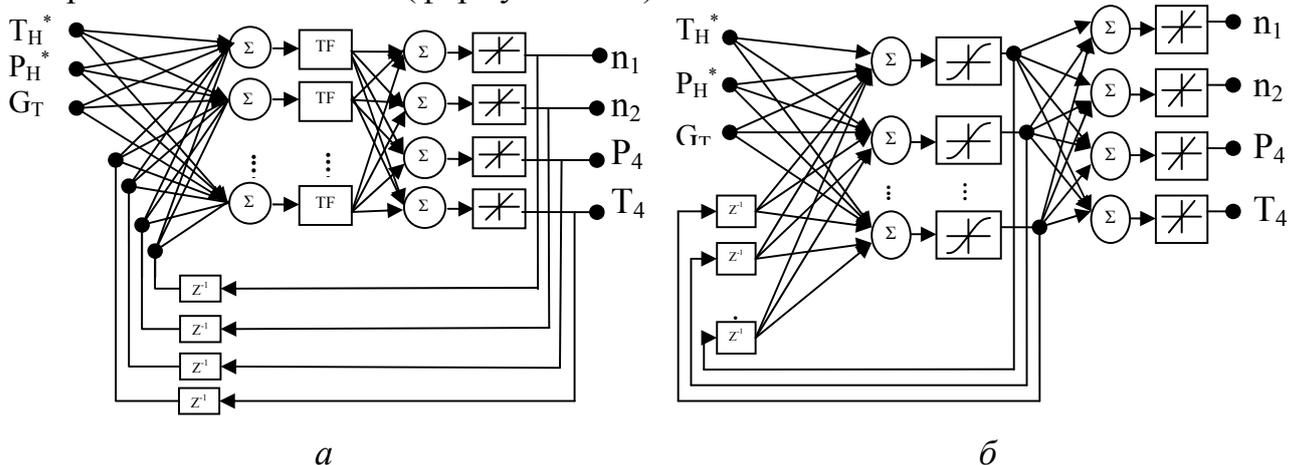


Рисунок 2. Архитектуры рекуррентных НС

$$f(x) = kx + b \tag{1}$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (3)$$

Анализ результатов моделирования различных НС-моделей показывает, что оптимальной архитектурой является рекуррентная архитектура НС с общей обратной связью (рис. 2, а) и сигмоидной функцией активации, формула (2). Анализ существующих алгоритмов обучения показывает, что наиболее эффективным является алгоритм Левенберга – Марквардта. Учитывая требования, предъявляемые данным алгоритмом к оперативной памяти, исследовались методы формирования малой обучающей выборки. В результате проведенных исследований было предложено формировать обучающую выборку на основе метода прореживания по амплитуде. В этом методе экспериментальные точки выбираются на основе прореживания по амплитуде $\Delta p = \text{const}$, где p – один из измеряемых параметров. Условием попадания экспериментальной точки в обучающую выборку является отклонение ее абсолютной величины в диапазоне измерения Δp . Применение данного метода позволяет уменьшить количество экспериментальных точек в обучающей выборке до 8 – 10% от общего числа.

В процессе разработки алгоритма идентификации АНС обоснована необходимость применения метода главных компонент для определения размера «горлового» слоя, на основе которого становится возможным сократить интервал поиска размера «горлового» слоя АНС.

Проводится анализ полученных решений на работоспособность в рамках бортового вычислителя. Так расчет требуемого объема памяти для хранения коэффициентов НС-моделей (V_{RAM_1}) и АНС (V_{RAM_2}) проводился по формулам:

$$V_{RAM_1} = ((N_{IN} + 1) \cdot N_1 + (N_1 + 1) \cdot N_{OUT}) \cdot V_K \quad (4)$$

$$V_{RAM_2} = ((N_{IN} + 1) \cdot N_1 + (N_1 + 1) \cdot N_2 + (N_2 + 1) \cdot N_3 + (N_3 + 1) \cdot N_{OUT}) \cdot V_K \quad (5)$$

где N_{IN} – размер входного слоя нейронной НС, N_I – размер первого скрытого слоя НС, N_{OUT} – размер выходного слоя НС и V_K – объем памяти, требуемый для хранения одного коэффициента.

Расчет количества выполняемых операций (V_{ADD} – количество операций сложения, V_{MUL} – количество операций умножения) для НС-моделей проводился по следующим формулам:

$$V_{ADD} = N_{IN} \cdot N_1 + 3 \cdot N_1 + N_1 \cdot N_{OUT}, \quad (6)$$

$$V_{MUL} = N_{IN} \cdot N_1 + 3 \cdot N_1 + N_1 \cdot N_{OUT}. \quad (7)$$

Расчет выполняемых операций для АНС проводился по следующим формулам:

$$V_{ADD} = N_{IN} \cdot N_1 + 3 \cdot N_1 + N_1 \cdot N_2 + N_2 \cdot N_3 + 3 \cdot N_3 + N_3 \cdot N_{OUT}, \quad (8)$$

$$V_{MUL} = N_{IN} \cdot N_1 + 3 \cdot N_1 + N_1 \cdot N_2 + N_2 \cdot N_3 + 3 \cdot N_3 + N_3 \cdot N_{OUT}. \quad (9)$$

В результате расчета аппаратных требований по формулам (4-9), было установлено, что требуемый объем памяти для хранения НС-моделей ГТД и АНС не превышает 5 Кб, а суммарное время не превышает 2 мс.

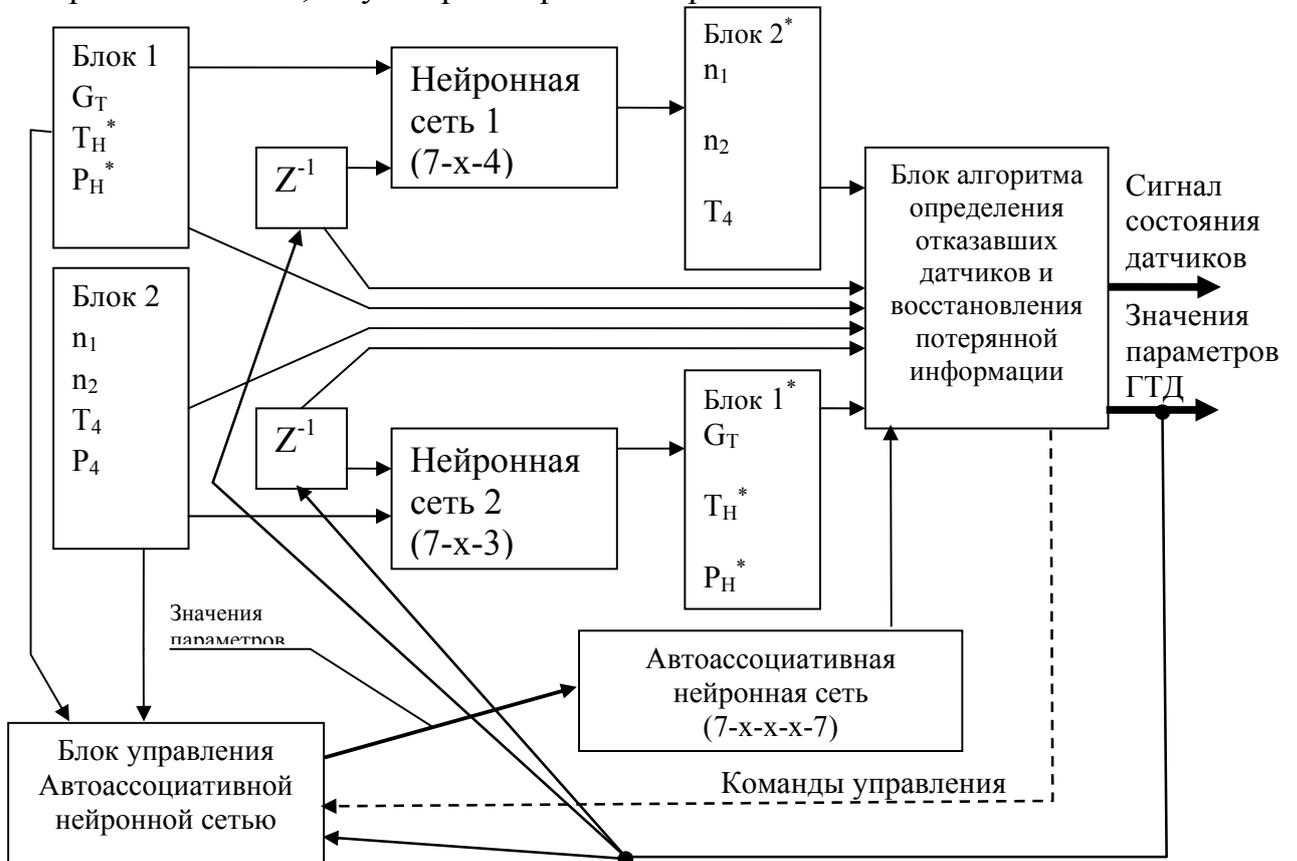


Рисунок 3. Функциональная схема блока контроля измерений параметров ГТД

На основе полученных НС-моделей и АНС предложена функциональная схема бортового блока контроля измеряемых параметров ГТД (рис. 3). Блок алгоритма определения отказавших датчиков в качестве входных сигналов получает: измеренные с датчиков значения параметров ГТД; окружающей среды; расчетные значения параметров авиационного двигателя; расчетные значения параметров окружающей среды; предыдущие корректные значения всех измеряемых параметров; значения измеряемых параметров, обработанные автоассоциативной нейронной сетью. На основании полученных данных блок контроля параметров в соответствии с предложенным алгоритмом (рис. 4) оценивает состояние измерительных каналов и выдает последующим блокам скорректированную информацию с измерительных каналов. Результаты моделирования приведенного выше алгоритма показывают, что в случае превышения параметром допустимого значения на рассогласование измеренных и расчетных значений проводится проверка его значения на корректность, после чего принимается решение об исправности данного датчика. Численное моделирование алгоритма БКИП ГТД на ЭВМ показало, что максимальная

погрешность восстановления потерянной информации в результате отказа датчика не превысила 0,9%.

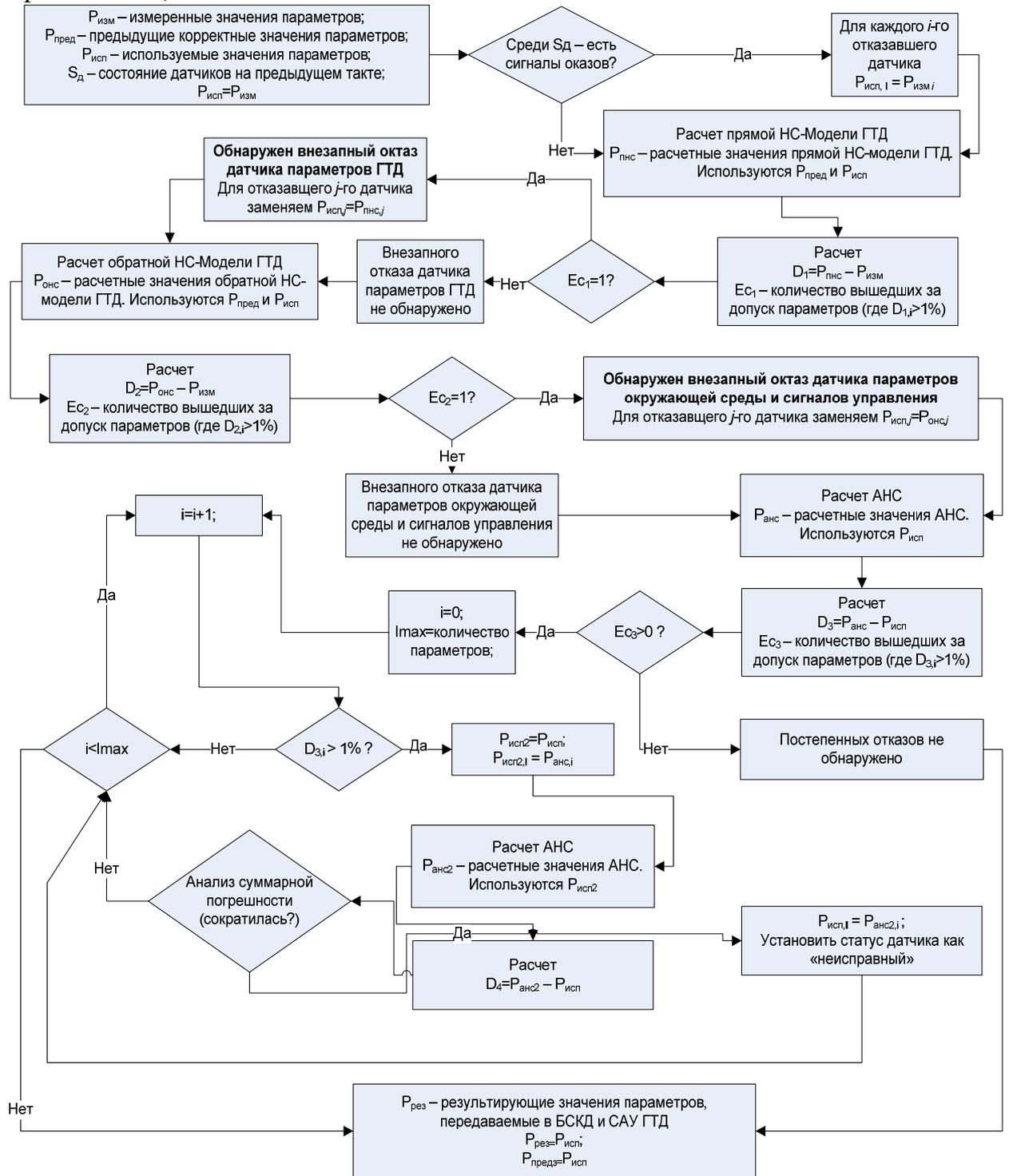


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма обнаружения и парирования отказов информационных каналов

В четвертой главе на основе разработанных системных моделях БКИП ГТД производится разработка программного обеспечения для идентификации NS-

моделей ГТД и АНС. Приведен способ модификации алгоритма обучения Левенберга – Марквардта, что позволило сократить требования к ОЗУ в два раза и увеличить скорость данного алгоритма обучения на 24%. Алгоритмы и методы ПО разработаны на основе технологии ООП на языке С, что позволяет использовать разработанные объекты (структуры, классы и функций) в программных проектах, для внедрения в БКИП ГТД. Разработан алгоритм адаптации НС-моделей ГТД в бортовых условиях, который позволяет учитывать индивидуальные характеристики отдельного ГТД. С целью оценки аппаратных требований разработанного алгоритма адаптации НС-моделей ГТД в бортовых условиях определены зависимости, по которым можно оценить требования предъявляемые алгоритмом обучения НС к бортовым вычислителям. Общее количество коэффициентов хранимых в памяти ЭВМ предложено рассчитывать по формуле:

$$KN = \left(LN \cdot NS_{Lnum} + 5 + \sum_{\substack{i=0..(Lnum-1) \\ j=1..Lnum}} (NS_i + 1) \cdot NS_j \right) \cdot \sum_{\substack{i=0..(Lnum-1) \\ j=1..Lnum}} (NS_i + 1) \cdot NS_j + \\ (6 \cdot LN + 4 \cdot NS_{Lnum} \cdot LN) \cdot \sum_{i=1..N_{Lnum}} NS_i + LN \cdot NS_{Lnum} \cdot \left(\sum_{\substack{i=0..(Lnum-1) \\ j=1..Lnum}} NS_i \cdot NS_j + 1 \right) \quad (10)$$

где $Lnum$ – количество скрытых слоев нейронной сети; LN – размер обучающих данных; $NS_{0,1,2,\dots,i,\dots,Lnum}$ – размер i -го слоя нейронной сети (количество нейронов), где NS_0 – количество нейронов на входе НС.

Количество выполняемых операций предлагается вычислять по формулам:

$$OPM_f = NS_{Lnum} \cdot LN \cdot \sum_{i=1..NS_{Lnum-1}} NS_{i+1} \cdot NS_i + NS_{Lnum} \cdot LN \cdot dTFM \cdot BS + NN \cdot LN \cdot NS_{Lnum} \\ + NN \cdot (LN \cdot NS_{Lnum})^2 + NN + LN \cdot \sum_{i=1..NS_{Lnum-1}} NS_i \cdot NS_{i+1} + TFM \cdot NS_2 \cdot LN; \quad (11)$$

$$OPP_f = NS_{Lnum} \cdot LN \cdot \sum_{i=1..NS_{Lnum-1}} (NS_{i+1} - 1) \cdot NS_i + NS_{Lnum} \cdot LN \cdot dTFP \cdot \sum_{i=1..NS_{Lnum-1}} NS_i + \\ + (NN - 1) \cdot (LN \cdot NS_{Lnum})^2 + (NN - 1) + LN \cdot \sum_{i=1..NS_{Lnum-1}} (NS_i - 1) \cdot NS_{i+1} + TFP \cdot NS_2 \cdot LN; \quad (12)$$

$$OPD_f = dTFD \cdot NS_2 \cdot LN + TFD \cdot NS_2 \cdot LN. \quad (13)$$

где OPP_f – количество выполняемых операций сложения с плавающей запятой; OPM_f – количество выполняемых операций умножения с плавающей запятой; OPD_f – количество выполняемых операций деления с плавающей запятой; TFP_f – количество операций сложения в передаточных функциях с плавающей запятой; TFM_f – количество операций умножения в передаточных функциях нейронов с плавающей запятой; TFD_f – количество операций деления в передаточных функциях с плавающей запятой; $dTFP_f$, $dTFM_f$, $dTFD_f$ – аналогичные коэффициенты количества операций в производных функций активации.

Показано, что для реализации алгоритма обучения в бортовых условиях требуется процессор с производительностью не ниже 100 MFLOPS. В качестве аналога процессору ST10F269 предлагается использовать процессор TMS320C6727B, который имеет производительность 2 GFLOPS, что позволит реализовать алгоритм обучения НС-моделей ГТД и АНС в бортовых условиях.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена концепция построения бортовых алгоритмов восстановления информации измерительных каналов, на основе технологии нейронных сетей, позволяющих эффективно и качественно восстанавливать потерянную информацию в режиме реального времени.

2. Разработан комплекс функциональных моделей процесса контроля измерений параметров авиационного двигателя на основе IDEF технологий, что позволило выделить основной спектр задач и сформулировать требования к их реализации в составе бортовой нейросетевой интеллектуальной системы контроля технического состояния ГТД; разработан комплекс информационных моделей процесса контроля измерений параметров авиационного двигателя, на основе технологии IDEF/IX, что позволило определить логическую структуру и механизмы взаимодействия отдельных интеллектуальных компонент в составе разрабатываемой бортовой нейросетевой интеллектуальной системы контроля измеряемых параметров авиационного ГТД; построена динамическая модель процесса контроля измеряемых параметров авиационного двигателя на основе IDEF/CPN, что позволило определить требования к механизму логического вывода в процессе выполнения функций контроля измеряемых параметров бортовой нейросетевой интеллектуальной системой.

3. Предложена методика идентификации НС-моделей ГТД и АНС, на основе нейросетевых технологий, позволяющая получать качественное решение задачи контроля измеряемых параметров ГТД в условиях бортовой реализации.

4. Предложен алгоритм определения отказов измерительных каналов и восстановления потерянной информации на основе НС-моделей ГТД, позволяющий локализовать отказ и восстановить потерянную информацию с погрешностью не более 0,9% от диапазона изменения значения параметра. Время реализации бортовых алгоритмов на базе процессора ST10F269 не превысило 1,67 мс, объем оперативной памяти необходимый для реализации бортовых алгоритмов не превысил 5 Кб, что в условиях развития современной аппаратной базы позволяет с минимальными затратами и максимальной эффективностью решать такие задачи.

5. Предложен модифицированный алгоритм обучения нейронных сетей Левенберга – Марквардта, реализация которого требует в два раза меньше оперативной памяти, а время реализации меньше на 24%. Данный алгоритм

разработан на базе языка программирования С, что позволяет встраивать его в виде программного кода, который является модифицируемым, расширяемым и позволяет максимально учесть основные особенности большинства решаемых задач в бортовых условиях. Разработан алгоритм адаптации НС-моделей в бортовых условиях, позволяющий максимально учесть индивидуальные параметры конкретного авиационного двигателя. Установлено, что наиболее ресурсоемкой операцией этого алгоритма является процесс обучения нейронных сетей, реализация которого в бортовых условиях показала, что для осуществления процесса обучения нейронных сетей в режиме реального времени необходим микропроцессор с производительностью не ниже 100 MFLOPS.

6. Разработано программное обеспечение для идентификации НС-моделей ГТД и АНС, реализующее предложенную методику, которое основано на объектно-ориентированной парадигме, позволяющей использовать инкапсуляцию, наследие и полиморфизм для модернизации и модификации разработанных бортовых алгоритмов. Применение широко используемого языка программирования С позволяет реализовывать данные алгоритмы на множестве альтернативных вычислительных платформ, которые содержат в своем составе компилятор языка С.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Задача контроля информационных каналов авиационного ГТД в бортовых условиях / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Вестник СГАУ имени акад. С.П. Королева. Самара : Изд-во СГАУ, 2007. Т. 1., № 2. С. 157 – 161.

Другие публикации

2. Парирование отказов датчиков нейронными сетями для повышения отказоустойчивости газотурбинных двигателей / **И.И. Муслухов, В.И. Васильев, С.В. Жернаков** // Вычислительная техника и новые информационные технологии : сб. науч. ст. Уфа : УГАТУ, 2003. С. 35 – 41.

3. Использование нейросетевых информационных технологий для повышения отказоустойчивости авиационного двигателя / **И.И. Муслухов, В.И. Васильев, С.В. Жернаков** // Компьютерные науки и информационные технологии : сб. науч. тр. 5-й междунар. конф. (CSIT'2003). Уфа : УГАТУ, 2003. Т. 2. С. 91 – 96 (На англ. языке).

4. Разработка нейросетевого метода повышения отказоустойчивости авиационного ГТД / **И.И. Муслухов** // Туполевские чтения : сб. матер. XI всерос. науч.-техн. конф. Казань : КГТУ им. Туполева, 2003. Т. 3. С. 77.

5. Повышение живучести информационных каналов авиационного ГТД на базе нейросетевого модуля / **И.И. Муслухов** // Интеллектуальные системы

управления и обработки информации : сб. матер. всерос. молодежн. науч.-техн. конф. Уфа : УГАТУ, 2003. С. 37.

6. Повышение живучести информационных каналов сложных объектов с использованием искусственных нейронных сетей на примере газотурбинного двигателя / **И.И. Муслухов** // Федеральная итоговая научно-техническая конференция творческой молодежи России : сб. науч. тр. М. : МГУЭиМ, 2003. С. 91 – 92.

7. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ №2003612143. Мастер создания, обучения и тестирования автоассоциативных нейронных сетей / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков**. М. : Роспатент, 2003. Зарег. 15.09.2003.

8. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ №2004611145. Экспертная система «Эксперт-Нейро» / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков**. М. : Роспатент, 2004. Зарег. 11.05.2004.

9. Система автоассоциативной нейронной сети и персептрона для восстановления потерянной информации с датчиков / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Компьютерные науки и информационные технологии : сб. науч. тр. 7-й междунар. конф. (CSIT'2005). Уфа : УГАТУ, 2004. Т. 2. С. 203 – 208. (На англ. языке).

10. Восстановление потерянных данных с датчиков на базе автоассоциативных нейронных сетей / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Мехатроника, автоматизация, управление: сб. тр. второй всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Уфа : УГАТУ, 2005. Т. 2. С.339 – 344.

11. Высокопроизводительный вычислитель для восстановления потерянной информации / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // VIII Королевские чтения : сб. тр. всерос. молодежн. науч. конф. Самара : СГАУ им. акад. С.П. Королева, 2005. С. 324.

12. Метод восстановления значений с отказавших датчиков / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Туполевские чтения : сб. матер. XII всерос. науч.-техн. конф. Казань : КГТУ им. Туполева, 2005. Т. 3. С. 142 – 143.

13. Нейросетевой метод восстановления информации с датчиков ГТД / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Нейроинформатика и ее приложения 2005: сб. матер. 8-го всерос. науч. сем. Красноярск : Изд-во ИВМ СО РАН, 2005. С. 61 – 62.

14. Высокоскоростной вычислитель для реализации алгоритма восстановления информации отказавшего датчика ГТД / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Моделирование неравновесных систем 2005 : сб. матер. 8-го всерос. науч. сем. Красноярск : Изд-во ИВМ СО РАН, 2005. С. 123 – 124.

15. Оптимизированный алгоритм Левенберга – Маркварда для обучения нейронных сетей / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Нейроинформатика и ее приложения : сб. матер. XIV всерос. науч. сем. Красноярск : Изд-во ИВМ СО РАН, 2006. С. 46 – 47.

16. Моделирование газодинамического тракта авиационного двигателя в бортовых условиях / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Моделирование

неравновесных систем 2006 : сб. матер. всерос. науч. сем. Красноярск : Изд-во ИВМ СО РАН, 2006. С. 75 – 76.

17. Архитектура вычислителя для решения задачи восстановления потерянных данных с датчиков на базе нейронной сети / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Нейроинформатика-2006 : сб. науч. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. М. : МИФИ, 2006. Т. 3. С.180 – 188.

18. Бортовая интеллектуальная система контроля и диагностики авиационного ГТД в режиме реального времени / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Актуальные проблемы в науке и технике : матер. рег. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : УГАТУ, 2007. Т. 2. С. 108 – 112.

19. Повышение точности контроля измерений газодинамических параметров ГТД в режиме реального времени / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков** // Компьютерные науки и информационные технологии : сб. науч. тр. 9-й междунар. конф. (CSIT'2007). Уфа : УГАТУ, 2007. Т. 2. С. 108 – 112. (На англ. языке).

20. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ №2007612510. Система идентификации нейросетевой математической модели «Борт-Нейро» / **И.И. Муслухов, С.В. Жернаков**. М. : Роспатент, 2007. Зарег. 15.06.2007.

Диссертант

Муслухов И.И.

МУСЛУХОВ Ильдар Ирекович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БОРТОВЫХ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ГТД НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.11.2007. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ № 573

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