

На правах рукописи

АБДУЛНАГИМОВ Ансаф Ирекович

**НЕЧЕТКИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ОТКАЗОВ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ,
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ГТД**

**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 автоматизированных систем управления

Научный руководитель	д-р техн. наук АРЬКОВ Валентин Юльевич
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. КРЫМСКИЙ Виктор Григорьевич кафедра информационно- управляющих систем Уфимской государственной академии экономики и сервиса канд. техн. наук ЧЕЧУЛИН Анатолий Юрьевич ОАО «Уфимское агрегатное предприятие «Гидравлика»
Ведущая организация	ОАО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния»

Защита диссертации состоится 14 декабря 2011 года в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 11 ноября 2011 г.

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



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Безопасность полета во многом определяется состоянием силовой установки летательного аппарата и ее системы управления. Современные бортовые цифровые системы автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД) позволяют измерять большое количество параметров газотурбинного двигателя (ГТД) и его систем и получать массивы такой информации в цифровом виде. Для решения текущих задач управления и контроля состояний во время полета, как правило, используется малая часть этих данных. Более глубокий анализ такой информации может улучшить глубину контроля и принять соответствующие меры до наступления критических отказов, и, таким образом, повысить безопасность полетов.

Современные цифровые системы автоматического управления, контроля и диагностики характеризуются большим числом функций регулирования, контроля и диагностики, в то время как наиболее критичными в ГТД являются его элементы и блоки (датчики, исполнительные механизмы и т.д.). Анализ отечественных и зарубежных двигателей показывает, что больше всего отказов происходит в узлах двигателя и САУКиД (для САУКиД это 40 – 75 %). Отказы, связанные с износом и разрушением элементов ГТД и его систем, могут развиваться скачкообразно, либо постепенно, и своевременное обнаружение таких изменений (деградации характеристик) является актуальной задачей в области эксплуатации и технического обслуживания авиационной техники.

Существующие в настоящее время технологии обнаружения отказов основаны преимущественно на четких логических операциях и выявляют лишь два состояния – «исправное состояние» либо «отказ», и не учитывают процессы деградации элементов или блоков. Оценка степени деградации создает предпосылки к переходу от двухзначной логики к нечеткой для анализа процессов развития отказов САУКиД ГТД. Используя алгоритмические, логико-вероятностные и нечеткие методы анализа постепенных отказов (постепенное изменение характеристик или конструктивных параметров) можно во многих случаях предотвратить возникновение аварийных и катастрофических ситуаций, либо подготовить экипаж к принятию экстренных мер путем заблаговременного информирования о «приближении» к критической ситуации.

С появлением высокопроизводительной вычислительной техники открываются возможности более глубокого и качественного анализа экспериментальных данных. Эта проблема особенно актуальна для обработки марковских моделей сложных динамических систем с отказами, особенно в части построения распределенных иерархических моделей.

Совершенствование систем автоматического управления контролем и диагностики ГТД представляет собой резерв повышения качества силовой установки и обеспечения все более жестких летно-технических требований в широком диапазоне режимов работы и условий полета.

Различные подходы к решению проблемы контроля и диагностики технического состояния ГТД представлены в работах В. Г. Августиновича, А. М. Ахмедзянова, И. А. Биргера, В. И. Васильева, Х. С. Гумерова, В. Т. Дедеша, Н. Г. Дубравского, И. В. Егорова, С. В. Епифанова, В. Н. Ефанова, Ю. С. Кабальнова, В. Г. Крымского, Г. Г. Куликова, В. Ю. Арькова, С. В. Жернакова, А. И. Фрида, Д. Ф. Симбирского, Н. Н. Сиротина, А. П. Тунакова, В. Т. Шепеля и других.

В диссертации предлагается дальнейшее развитие моделей и методов исследования систем контроля и диагностики ГТД в аспекте оценивания степени деградации на различных уровнях иерархии сложной системы.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности контроля и диагностики технического состояния ГТД и его систем на основе нечетких иерархических марковских моделей процессов развития отказов.

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

1. Разработать иерархическую модель анализа развития процессов отказов, на примере САУКиД.
2. Разработать методику определения параметров состояния САУКиД и его систем на основе нечеткой логики.
3. Разработать метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования нелинейной динамики.
4. Разработать методику полунатурных испытаний САУКиД ГТД на основе иерархических распределенных марковских моделей.

Методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решались с использованием теории автоматического управления, теории идентификации, метода анализа иерархий, нечеткой логики, методов системного моделирования, теории марковских и случайных процессов и др. Обработка экспериментальных данных проводилась средствами диалоговой системы Matlab с интегрированной средой визуального моделирования Simulink; схема активных экспериментов отработывалась на полунатурном стенде УНПП «Молния».

На защиту выносятся:

1. Иерархическая модель процессов развития отказов, которая интегрирует функциональную, физическую структуру элементов и блоков САУКиД, дерево состояний, дерево коэффициентов влияния отказов.
2. Методика определения параметров состояния САУКиД и его систем на основе нечеткой логики для оценки степени деградации САУКиД, его узлов и элементов на основе нечеткой дискретно-упорядоченной шкалы и коэффициентов влияния отказов.
3. Метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования путем идентификации нелинейных характеристик в гидромеханической части на основе когнитивной графики и параллельных вычислений.
4. Методика автоматизированных полунатурных испытаний САУКиД ГТД на основе иерархических марковских моделей, включающая имитацию одиноч-

ных, множественных отказов датчиков, исполнительных механизмов и двигателя, а также их комбинации в заранее заданной последовательности.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана иерархическая модель процессов развития отказов, *отличающаяся тем*, что интегрирует функциональную, физическую структуру элементов и блоков САУКиД, дерево состояний и дерево коэффициентов влияния отказов.

2. Методика определения параметров состояния САУКиД и его систем на основе нечеткой логики, *отличающаяся тем*, что определяет степень деградации на основе дискретно-упорядоченной шкалы и коэффициентов влияния отказов.

3. Метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования, *отличающийся тем*, что для обнаружения отказов анализируется эмпирическое многомерное распределение, которое свидетельствует о нелинейности характеристик в гидромеханической части, причем для построения статистических оценок используются параллельные вычисления.

4. Методика автоматизированных полунатурных испытаний САУК ГТД на основе иерархических марковских моделей, *отличающаяся тем*, что имитирует одиночные и множественные отказы датчиков, исполнительных механизмов и двигателя, а также их комбинации в заранее заданной последовательности.

Практическую ценность имеют:

1. Разработанная иерархическая модель процессов развития отказов, применение которой позволяет декомпозировать силовую установку на более чем 10 уровней иерархии для анализа постепенных отказов и количественной оценки степени деградации.

2. Разработанная методика определения параметров состояния САУКиД и его систем на основе нечеткой логики, применение которой позволяет обнаруживать на стадии развития 30 % постепенных отказов от всех отказов САУКиД в процессе полета и технического обслуживания на земле.

3. Метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования обеспечивающий раннее обнаружение отказов, за счет анализа постепенного ухудшения характеристик, вызванных развитием нелинейности, типа зоны нечувствительности.

4. Методика автоматизированных полунатурных испытаний САУК ГТД на основе иерархических марковских моделей, применение которой позволяет снизить объем ручных операций за счет моделирования всех видов отказов и сократить время испытаний функций контроля в 3 – 4 раза.

Апробация работы

Основные положения работы были доложены и обсуждены на: XXXII и XXXIII Международных молодежных конференциях «Гагаринские Чтения» (2006, 2007, г. Москва); Всероссийских молодёжных научных конференциях «Мавлютовские чтения» (2007, 2008, г. Уфа); III и IV Всероссийских зимних школах-семинарах аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (2008, 2009, г. Уфа); III Международной научно-технической

конференции «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА» (2010, г. Москва); V Международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» РАСО'2010 (2010, г. Москва); Международной конференции ИФАК «Методологии управления и технологии эффективного использования энергии» (2010, Португалия).

Основания для выполнения работы. Работа выполнена на кафедре Автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета при поддержке грантов Министерства образования и науки Российской Федерации - АД-АД-06-11-КФ, ИФ-АС-10-11-ОЗ/А; РФФИ - ИФ-АС-21-10-ГФ; ИВМ - ИВМ ИФ-АС-01-09-ГИ и гранта Президента РФ.

Публикации

Основные положения и результаты исследования по теме диссертации опубликованы и непосредственно отражены в 13 работах, из них 4 – в изданиях, входящих в список ВАК, в том числе 4 патента РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, результатов и выводов, списка литературы, содержит 140 листов машинописного текста и включает 54 рисунка, 4 таблицы, 110 наименований использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава посвящена обзору существующих методов контроля и диагностики состояния ГТД и его систем, а также разработке иерархической модели состояний на основе процессов развития отказов.

Для текущей оценки системной безопасности САУКиД предложено формализованное представление в виде иерархической структуры как сложной системы, состоящей из подсистем и элементов (узлов) со встроенными функциями контроля и диагностики. Проведена декомпозиция САУКиД ГТД на независимые подсистемы различного уровня иерархии по структурным и функциональным признакам (рис. 1).

Предложена иерархическая классификация отказов, на примере САУКиД ГТД. В таблице 1 для каждого уровня классифицированы отказы и состояния системы, а также приоритеты устранения отказов.

Метод анализ иерархий позволяет перейти к модели процессов развития отказов для оценки состояния системы на каждом уровне иерархии. Текущее состояние САУКиД предлагается оценивать с помощью нового показателя – «степени деградации».

Математическая модель состояний на основе процессов развития отказов представлена в виде $S = \langle G, F, L, R \rangle$, где G – иерархия отказов системы,

F - качественная оценка отказов, L – набор коэффициентов влияния отказов, R - система взаимовлияния отказов. Глубина иерархии G обозначается через h , причем $h=0$ для корневого элемента G .

Для G выполняются следующие условия:

1. Существует разбиение G на подмножества $h_k, k = 1 \dots n$.
2. Из $x \in h_k$ следует, что $x^- \subset h_{k+1}, k = 1, \dots, n-1$.
3. Из $x \in h_k$ следует, что $x^+ \subset h_{k-1}, k = 2, \dots, n$.

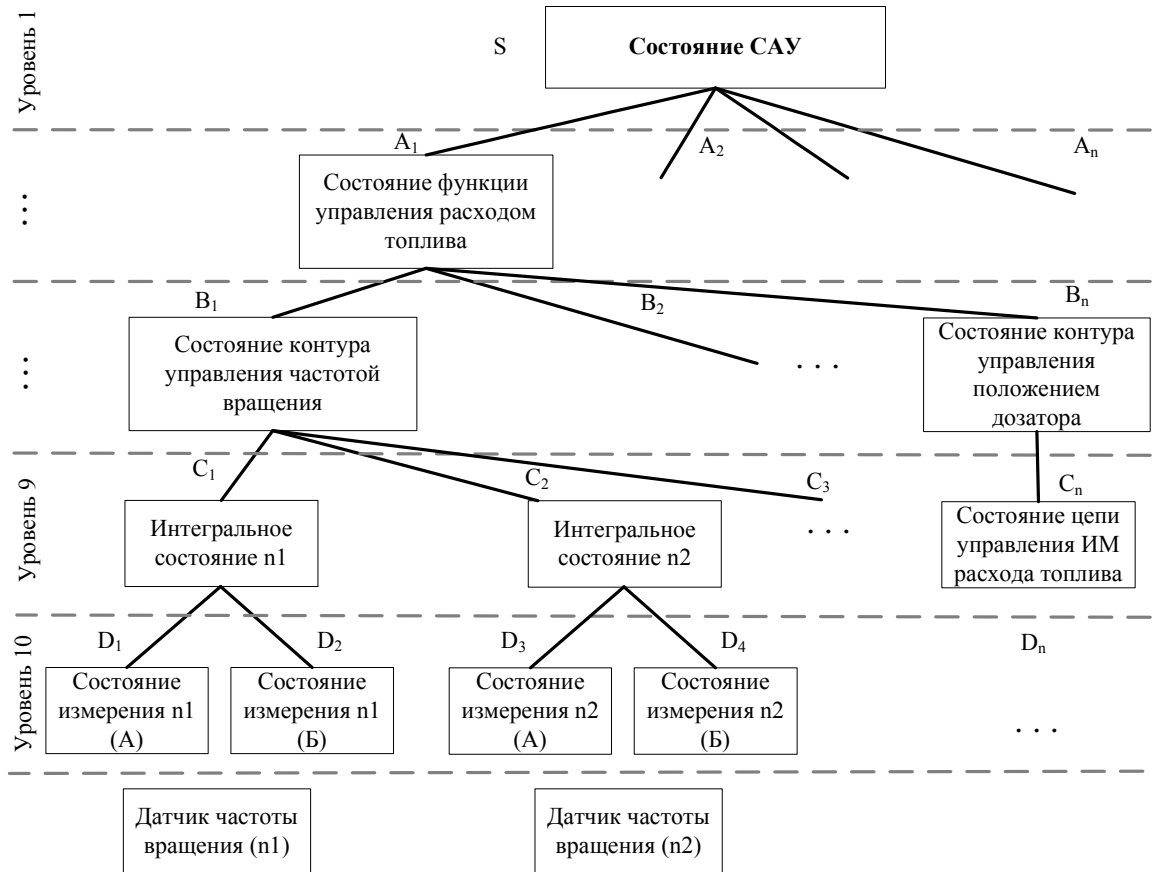


Рисунок 1 – Иерархическая модель процессов развития отказов САУКиД ГТД

Для каждого $x \in G$ существует такая весовая функция:

$$\omega_x : x^- \rightarrow [0,1], \text{ что } \sum_{y \in x^-} \omega_x(y) = 1.$$

Множества h_i являются уровнями иерархической модели, а функция ω_x есть коэффициент влияния отказа одного уровня относительно состояния системы x . Если $x^- \not\subset h_{k+1}$ (для некоторого уровня h_k), то ω_x определяется для всех h_k , если приравнять ее к нулю для всех отказов в h_{k+1} , не принадлежащих x^- .

Иерархическая модель САУКиД интегрирует:

- функциональную структуру (блок-схему);

- физическую структуру;
- дерево состояний (структуру состояния) элементов и блоков;
- дерево коэффициентов влияния отказов.

Таблица 1

Фрагмент иерархической классификации отказов

Уровни иерархии	Отказы САУКиД		Приоритет устранения отказа
Уровень 1	Отказ канала Б		Немедленное устранение
...	...		
Уровень 7	Отказ канала А		Краткосрочное устранение
Уровень 8		Отказ функции управления (А)	
	Отказ контура управления	Отказ контура управления (А)	
Уровень 9	Интегральный отказ измерения (отказ одноименных измеренных параметров)	Отказ цепи управления ИМ (А) (отказ линий связи датчиков или отказ аппаратной части САУ)	
Уровень 10	Отказ измерения в канале (обрыв или КЗ)		Долгосрочное устранение

Датчики

Исполнительные механизмы

На иерархическую модель накладывается система взаимовлияния отказов R с логическими операциями дизъюнкции и конъюнкции. Такая система взаимовлияния отказов позволяет анализировать состояние всей силовой установки, как снизу вверх, так и сверху вниз и проводить более глубокий анализ по различным уровням декомпозиции системы управления, за счет использования промежуточного состояния – деградации. Отказные состояния классифицируются в зависимости от степени деградации на «незначительное», «сложное», «опасно сложное», «катастрофическое». По степени деградации также можно оценивать расстояние до критической ситуации и скорость приближения к ней.

Предпосылкой реализации иерархической модели состояний на основе процессов развития отказов является использование распределенной аппаратной структуры САУКиД и интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностики, причем в каждом элементе или подсистеме ГТД реализована встроенная функция контроля (ВФК) на аппаратном или программном уровнях. ВФК отслеживает процесс деградации и устанавливает предотказное состояние на основе модели процессов развития отказов. Информация о техническом состоянии каждого элемента, узла или подсистемы собирается в САУКиД с

возможностью передачи информации в системы верхнего уровня, где оценивается состояние силовой установки в целом.

Вторая глава описывает методику оценки параметров состояний на основе нечеткой логики для контроля и диагностики процессов развития отказов.

Для повышения эффективности контроля технического состояния ГТД разработана методика определения параметров состояния САУКиД с привлечением нечетких методов анализа информации об отказах элементов системы. Дискретные сигналы об отказах элементов предлагается представить в виде нечетких лингвистических переменных.

Определены функции принадлежности для состояний «Исправно» и «Отказ», что позволяет оценить степень деградации и анализировать процесс развития отказа и устанавливать предотказное состояние. В этом случае, оценка степени деградации определяется по функции принадлежности S , которая принимает значения в диапазоне: $S \in [0,1]$.

Степень деградации в первом приближении может быть описана функцией принадлежности, например, трапецеидального вида. База правил представляется таблицей, которая заполняется нечеткими правилами следующим образом. При наступлении нескольких отказов может формироваться сигнал об отказе «вышестоящего» по иерархии элемента. В процессе фаззификации предлагается использовать дискретно-упорядоченную шкалу определения параметров состояний (рис.2), например, для датчиков с несколькими выходными обмотками. В этом случае, ранжирование состояний будет более объективным по сравнению с экспертными оценками.

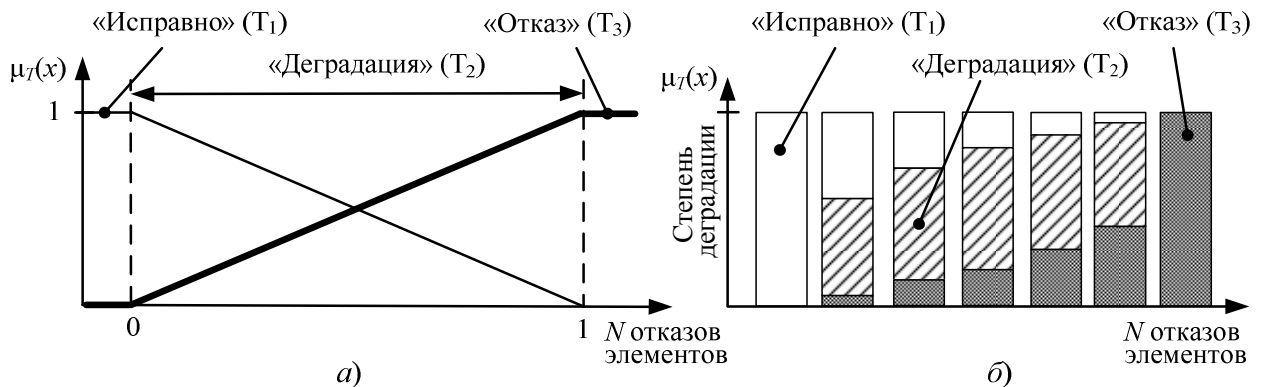


Рисунок 2 – Непрерывная (а) и дискретная (б) шкалы степени деградации

Оценка коэффициентов влияния отказов проводится на основе модифицированного метода анализа иерархий. Задача сводится к тому, чтобы n возможным отказам F_1, F_2, \dots, F_n поставить в соответствие множество числовых весов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, которые соответствовали бы фиксированным суждениям о значимости отказов САУКиД.

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & \dots & F_n \\ F_1 & \left[\begin{array}{cccc} \omega_1/\omega_1 & \omega_1/\omega_2 & \dots & \omega_1/\omega_n \end{array} \right] & & & \\ F_2 & \left[\begin{array}{cccc} \omega_2/\omega_1 & \omega_2/\omega_2 & \dots & \omega_2/\omega_n \end{array} \right] & & & \\ \vdots & \left[\begin{array}{cccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] & & & \\ F_n & \left[\begin{array}{cccc} \omega_n/\omega_1 & \omega_n/\omega_2 & \dots & \omega_n/\omega_n \end{array} \right] & & & \end{matrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} = \lambda_{\max} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix},$$

где ω – собственный вектор матрицы \mathbf{A} , λ_{\max} – максимальное собственное значение, близкое к порядку матрицы n , причем $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$.

Коэффициенты ω_i учитывают относительную степень влияния отказов на состояние элементов на следующем уровне иерархии.

На каждом уровне иерархии h_i для n элементов ГТД и его систем определяется вектор состояний $S_{h_i}(x_n)$ {исправно, деградация, отказ} с учетом коэффициентов влияния отказов:

$$S_{h_i}(x_n) = \mu_{h_i}(x_n) \cdot \omega_i,$$

где $\mu_{h_i}(x_n)$ – значение функции принадлежности элемента x_n (степень деградации). Для определения состояния элемента иерархии системы на более высоком уровне $S_{h_i}(x_n)$ для входных состояний нижнего уровня $S_{h_{i-1}}(x_n)$ выполняется дефаззификация.

Применение иерархических нечетких баз знаний позволяет агрегировать («сворачивать») состояния САУКиД в один вектор состояний. Анализируются ситуации, когда ошибка была пропущена или ложно выявлена, что сказывается на оценке состояния САУКиД. Для этого предлагается оценивать и анализировать вероятности ошибок первого и второго рода по фактическим данным об эксплуатации системы, например:

$$\hat{P}_{\text{ложн}} = \frac{N_{\text{ложн}}}{N_{\text{обнар}} + N_{\text{проп}} + N_{\text{ложн}} + N_{\text{норм}}}.$$

Состояние элементов во времени и по уровням иерархии зависит также и от предыдущих параметров состояний элементов, включая значения функции принадлежности, и от коэффициентов влияния отказов. Параметры предыдущего шага относительно анализируемого состояния на данный момент становятся четкими, т.к. данный цикл уже был исполнен и состояние подтвердилось. Такой процесс в общем случае удовлетворяет марковскому свойству (рис.3) для моментов времени t и $t + 1$ и представляется как

$$\mu_{h_i}(t+1) = K_1 \mu_{h_i}(t) + K_2 \psi,$$

где $\mu_{h_i}(t)$ – текущее значение функции принадлежности элемента, а ψ – вектор независимых случайных величин, K_1 и K_2 – коэффициенты, характеризующие свойство «марковости», определяются динамикой изменения состояния соот-

ветствующего элемента. K_1 и K_2 зависят от Δt , где Δt – продолжительность цикла контроля и диагностики.

$P_{ij} = \text{Pr ob}\{S_i \rightarrow S_j\}$	1	2	3
1. Исправное состояние	P_{11}	P_{12}	P_{13}
2. Состояние деградации	P_{21}	P_{22}	P_{23}
3. Отказ приводящий к остановке двигателя	P_{31}	P_{32}	P_{33}

Повторный запуск в полете

Рисунок 3 – Матрица вероятностей переходов в течение полета

Состояние элемента в иерархии силовой установки определяется с помощью базы правил отказов. Динамическая модель состояний определяется с учетом текущего состояния ГТД и коэффициентов влияния отказов, вызвавших это состояние (рис.4). Коэффициенты влияния отказов данного элемента на состояние подсистем верхнего уровня могут быть определены по статистическим данным или экспертным оценкам.

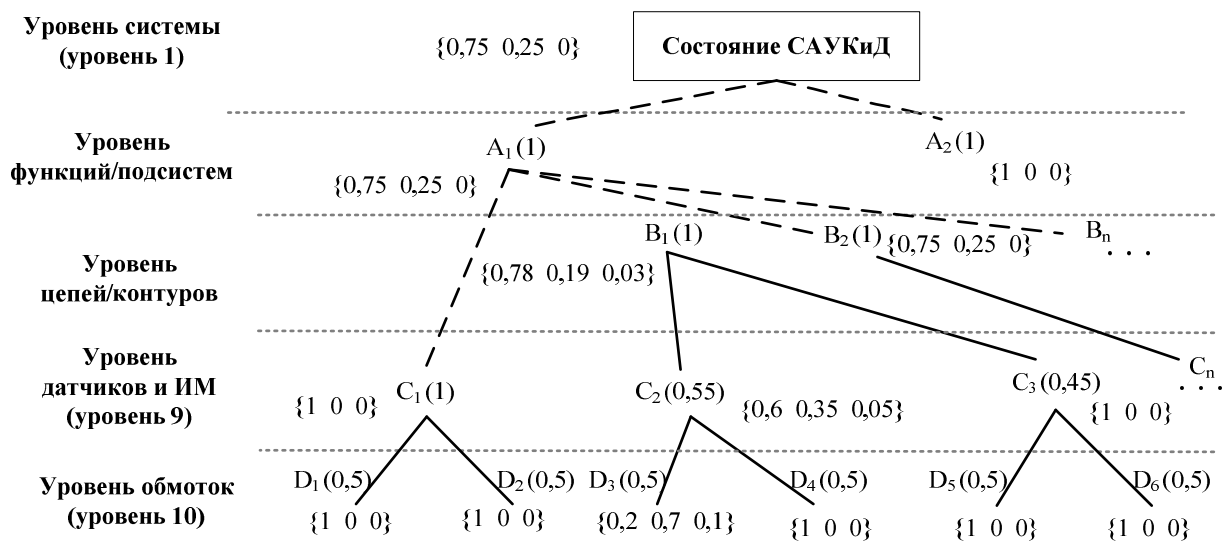


Рисунок 4 – Пример анализа иерархической структуры САУКиД ГТД с отказами

Третья глава описывает метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования, путем выявления развивающейся нелинейности. Рас-

смачивается проблема идентификации нелинейности в гидромеханической части САУ на примере обнаружения постепенного ухудшения характеристик дозирующего элемента по мере его износа. Для обнаружения нелинейности используются марковские модели стохастической динамики. В качестве диагностического признака предлагается использовать измерение формы распределения случайного сигнала, проходящего через нелинейную систему. В качестве математической модели объекта управления рассматривается описание в пространстве состояний и управлений в виде стохастического разностного уравнения

$$X(t+1) = \mathbf{A}X(t) + \mathbf{B}U(t) + \mathbf{F}\xi(t), \quad (1)$$

где $X \in R^s$ – s -мерный вектор состояний; $U \in R^s$ – s -мерный вектор управлений; \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{F} – матрицы размерности $(n \times n)$, $(n \times s)$ и $(n \times r)$ соответственно; $\xi \in R^r$ – вектор независимых случайных переменных. Таким образом, динамический объект, описываемый данным конечно-разностным уравнением, с входной координатой (управлением) U и выходной координатой (состоянием) X , в замкнутой схеме системы автоматического управления является управляемым марковским процессом.

Введение дискретизации по уровню позволяет перейти от марковского процесса к цепи Маркова. При условии стационарности процесса $\xi(t)$ цепь будет однородной. Такая цепь описывается с помощью стохастической матрицы вероятностей переходов \mathbf{P} размерностью $(m \times m)$, где m – количество состояний цепи. Каждый элемент матрицы \mathbf{P}_{ij} представляет собой вероятность перехода системы из состояния X_i в состояние X_j за время ΔT :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{ij} &= \text{Prob}\{X(t) \in X_i, X(t+1) \in X_j\}; \quad \forall n \in N; \\ X_i &\in \left[x_i - \frac{\Delta x}{2}; x_i + \frac{\Delta x}{2} \right]; \quad \sum_{j=1}^m \mathbf{P}_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (2)$$

Размер матрицы \mathbf{P} определяется априорной информацией о порядке модели объекта (1) и числом интервалов дискретизации Δx и Δu . Вероятности переходов оцениваются как относительные частоты соответствующих событий.

Статистическая оценка переходных вероятностей управляемой марковской цепи сводится к подсчету соответствующих событий за время наблюдения и последующему вычислению элементов матрицы \mathbf{P} по формуле:

$$P_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{\sum_{j=1}^m N_{ijk}},$$

где N_{ijk} – число событий вида $\{X(t_n) = X_i, X(t_{n+1}) = X_j, U(t_n) = U_k\}$, а знаменатель соответствует числу событий вида $\{X(t_n) = X_i, U(t_n) = U_k\}$. Таким образом, при любой комбинации состояния X_i и управления U_k получаем полную систему событий, заключающихся в переходах в состояния X_j .

Оценивание матрицы вероятностей переходов марковской модели состоит в построении многомерных гистограмм, которые представляют собой оценку

совместного распределения. Чтобы найти компромисс между дисперсией и смещением статистических оценок, предлагается проводить поиск оптимального разрешения по косвенному графическому критерию. Такой подход позволяет обнаруживать появление нескольких пиков (мод) распределения.

На рис. 5 представлены трехмерные графики (гистограммы) сечения матрицы вероятностей переходов, построенные с различной величиной интервала группирования и шириной перекрытия. Скачкообразные переходы между состояниями рассматриваются как признаки нелинейности, которая может быть вызвана, например, повышением трения в гидроцилиндре.

Для оценки многомерного массива вероятностей переходов могут потребоваться большие вычислительные мощности. Современные САУКиД порождают большие объемы информации. В частности, в бортовой цифровой системе циркулируют несколько сотен аналоговых и цифровых сигналов, что в результате может генерировать массивы размером несколько гигабайт в расчете на час полета. Оценка марковских моделей по таким исходным данным с применением метода оптимизации потребует длительных расчетов на персональном компьютере порядка нескольких часов или дней.

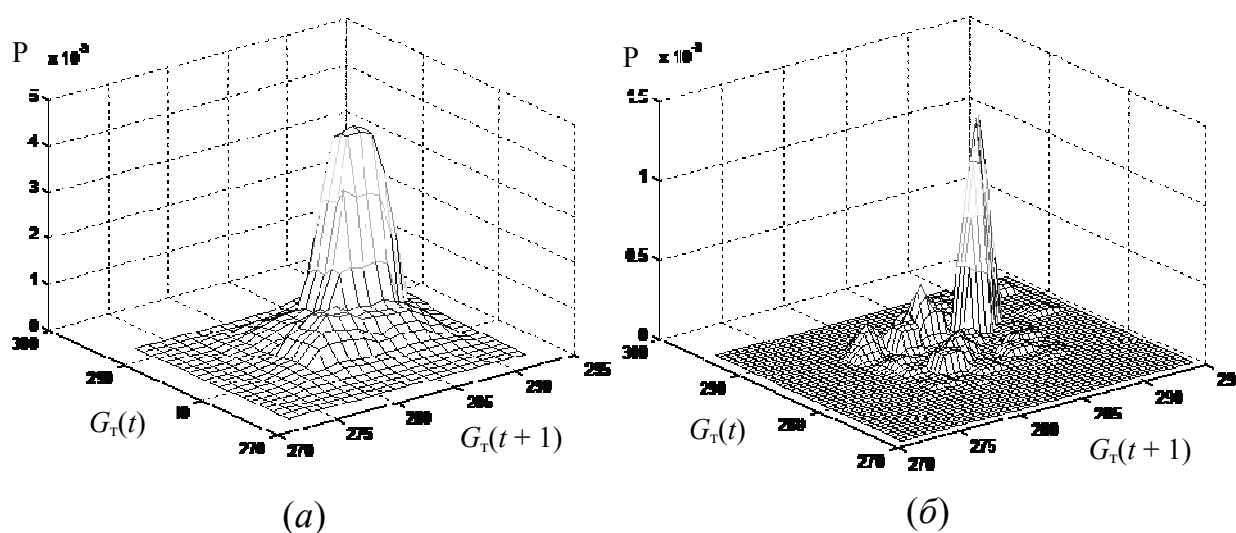


Рисунок 5 – Сглаженная (а) и оптимальная (б) оценки вероятностей переходов

Для обработки большого объема экспериментальных данных рассматривается возможность параллельной реализации метода анализа распределения для обнаружения нелинейности на суперкомпьютере в среде Matlab, что упрощает процесс разработки параллельных приложений, а также экономит время, с точки зрения расчетов и затрат на программирование.

Метод включает операцию «линеаризации» многомерных массивов переходных вероятностей для параллельной обработки в одном цикле вместо нескольких вложенных циклов. При этом многомерный массив предлагается представить в виде одномерного, для чего формируется вспомогательный массив индексов для каждой итерации цикла.

Графическая идентификация марковских моделей нестационарных динамических объектов позволяет автоматизировать массовую обработку экспериментальных данных САУКиД ГТД за счет параллельных вычислений и дает возможность сократить сроки экспериментальной доводки САУКиД, а также создает предпосылки к переходу к эксплуатации по состоянию.

Четвертая глава описывает методику полунатурных испытаний САУКиД ГТД, которая заключается в имитационном моделировании двигателя, датчиков и исполнительных механизмов в реальном масштабе времени, причем «расписание» испытаний составляется на основе иерархических нечетких марковских моделей процессов развития отказов.

Для реализации предложенной методики используется стенд для испытаний систем автоматического управления газотурбинных двигателей, схема которого приведена на рис.6. Имитация отказов различных элементов системы осуществляется путем внесения изменений выходного сигнала модели в автоматизированном режиме в соответствии с расписанием (циклограммой).

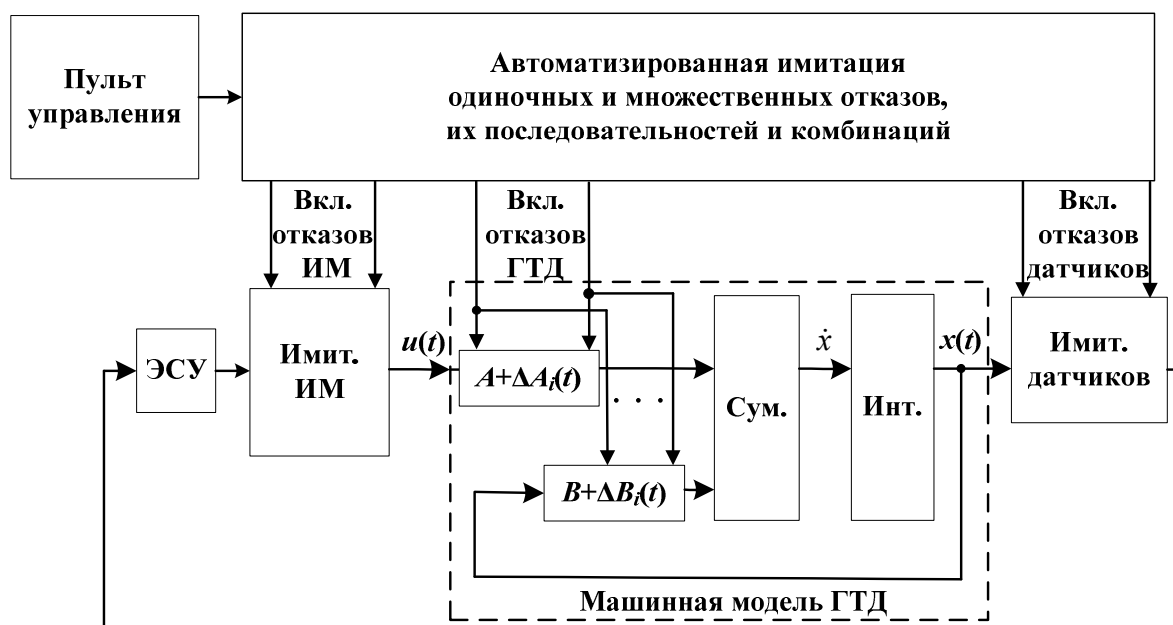


Рисунок 6 – Схема полунатурного стенда для испытаний САУКиД ГТД

Выходной сигнал имитационной модели определяется в следующем виде:

$$x(t) = \int_0^t [(A + \Delta_i A)x(t) + (B + \Delta_i B)u(t)] dt .$$

Задачей системы полунатурного моделирование отказов ГТД и его систем в составе программно-моделирующего комплекса является моделирование как одиночных, так и «следственных» (постепенных) отказов, то есть автоматического включения имитации отказов двигателя, его систем, датчиков и исполнительных механизмов в заданной последовательности.

Предлагается оптимизировать «расписание» включения отказов для снижения доли ручных операций в процессе полунатурных испытаний. План испытаний рассматривается как последовательность включения имитаторов отказов, причем взаимное влияние отказов описывается иерархической моделью, рассмотренной выше, а оптимизация плана испытаний по критерию минимальной продолжительности может осуществляться путем полного перебора вариантов.

На рис. 7 представлен пример моделирования отказа исполнительного механизма (ИМ) в контуре управления расходом топлива:

- отказ цепи управления ИМ расхода топлива I_A в канале А;
- отказ цепи управления ИМ расхода топлива I_B в канале Б;
- переключение на резервный гидромеханический регулятор.

Продолжительность полунатурных испытаний будет определяться не только временем имитационного моделирования отказов, но и временем на подготовку, планирование и документирование. В среднем в САУКиД насчитывается порядка 100 различных отказов, что по оценкам составляет примерно несколько тысяч комбинаций. Такие исследования потребуют около одного месяца ручных операций, с учетом дополнительных затрат на переключение (перезагрузку) САУКиД.

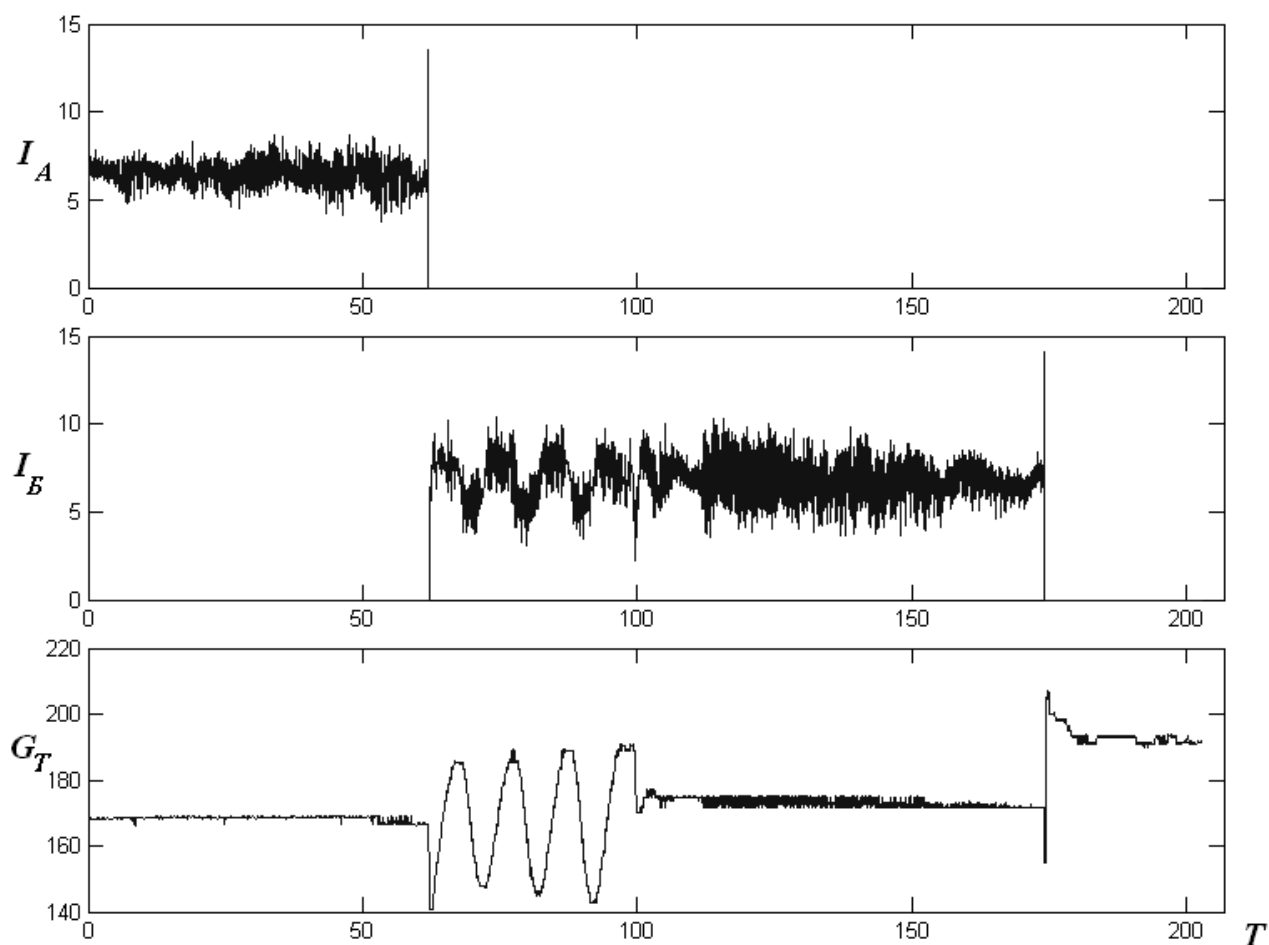


Рисунок 7 – Имитация отказа исполнительного механизма

Методика автоматизированных полунатурных испытаний позволяет подтвердить выполнение требований технического задания на проектирование САУКиД, исследовать процессы развития отказов в сжатые сроки. По экспертным оценкам, предлагаемая методика позволяет сократить длительность испытаний в 3 – 4 раз при доводке, отработке, сертификации САУКиД за счет сокращения количества ручных операций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана иерархическая модель развития процессов отказов, отличающаяся тем, что интегрирует функциональную, физическую структуру элементов и блоков САУКиД, дерево состояний, дерево коэффициентов влияния отказов и позволяет декомпозировать силовую установку на более чем 10 уровней иерархии для количественной оценки состояния деградации и постепенных отказов.

2. Предложена методика определения параметров состояния САУКиД и его систем на основе нечеткой логики, которая отличается тем, что определяет степень деградации на основе дискретно-упорядоченной шкалы и коэффициентов влияния отказов, что позволяет обнаруживать на стадии развития 30 % постепенных отказов от всех отказов САУКиД в процессе полета и технического обслуживания на земле.

3. Разработан метод обнаружения отказов на основе марковского моделирования, который отличается тем, что для обнаружения отказов анализируется эмпирическое многомерное распределение, которое свидетельствует о нелинейности характеристик в гидромеханической части, причем для построения статистических оценок используются параллельные вычисления, что в результате обеспечивает раннее обнаружение постепенных отказов за счет выявления постепенного ухудшения характеристик.

4. Предложена методика автоматизированных полунатурных испытаний САУКиД ГТД на основе иерархических распределенных марковских моделей, которая отличается тем, что имитирует одиночные и множественные отказы датчиков, исполнительных механизмов и двигателя, а также их комбинации в заранее заданной последовательности и позволяет снизить объем ручных операций за счет моделирования всех видов отказов и сократить время испытаний функций контроля в 3 – 4 раза.

ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В изданиях из перечня ВАК

1. Непараметрическая идентификация динамических моделей сложных систем на основе управляемых марковских цепей / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. №9. С.49–54.

2. Перспективы нейросетевой настройки процедуры спектрального анализа при идентификации динамических моделей / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. №10. С. 42–46.

3. Технология полунатурных испытаний интегрированных систем управления и контроля авиационных ГТД / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. №1. С. 37-40.

4. Методология полунатурного комплексного функционального моделирования ГТД и его систем / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, В. С. Фатиков, А. И. Абдулнагимов, Г. И. Погорелов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. 2009. № 3(19). Часть 2. С. 392–400.

В других изданиях

5. Технология полунатурных испытаний интегрированных систем управления и контроля авиационных ГТД на основе иерархических распределенных марковских моделей / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, Г. И. Погорелов, А. И. Абдулнагимов // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. №9(45). С. 153–157.

6. Нечеткая марковская модель реального времени для контроля и диагностики газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Авиадвигатели XXI века: материалы конф. – Электрон.дан.– М.:ЦИАМ, 2010.– С. 1579–1583.

7. Нечеткие марковские модели систем автоматического управления и контроля / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Интеллектуальные системы управления. Коллективная монография под редакцией акад. РАН Васильева С.Н. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 154–163.

8. Марковские модели для энергоэффективного управления газотурбинной силовой установкой / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Материалы конференции ИФАК по методологиям управления и технологиям эффективного использования энергии – Португалия, 2010. (Статья на англ. яз.).

9. Идентификация марковских моделей нестационарных динамических объектов на основе параллельных вычислений / Г. Г. Куликов, В. Ю. Арьков, А. И. Абдулнагимов // Параллельные вычисления и задачи управления РАСО'2010: Труды Пятой Международной конференции – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2010. – С. 343–350.

10. Пат. 2331054 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. Способ полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г. Г. Куликов, Г. И. Погорелов, В. Ю. Арьков, В. С. Фатиков, И. И. Минаев, С. В. Епифанов, А. И. Абдулнагимов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – №2006125866/06, заявл. 17.07.2006 ; опубл. 10.08.2008, Бюл. №22. – 11 с.

11. Пат. 68070 Российская Федерация, МПК F02C 9/28. Полунатурный стенд для испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей / Г. Г. Куликов, Г. И. Погорелов, В. Ю. Арьков, В. С. Фатиков, И. И. Минаев, С. В. Епифанов, А. И. Абдулнагимов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – №2007119898/22, заявл. 28.05.2007 ; опубл. 10.11.2007, Бюл. №31.

12. Пат. 2340883 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. Способ полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г. Г. Куликов, Г. И. Погорелов, В. Ю. Арьков, В. С. Фатиков, М. Р. Азанов, С. В. Епифанов, А. И. Абдулнагимов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – №2007118610/06, заявл. 18.05.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №34.

13. Пат. 89178 Российская Федерация, МПК F02C 9/28. Стенд для испытаний газотурбинных двигателей совместно с цифровой системой автоматического управления и контроля / Г. Г. Куликов, Г. И. Погорелов, В. Ю. Арьков, В. С. Фатиков, А. И. Абдулнагимов, А. Ю. Кузьмина; заявитель и правообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – №2009112051/22, заявл. 01.04.2009; опубл. 27.11.2009, Бюл. №33.

Диссертант

А.И. Абдулнагимов

АБДУЛНАГИМОВ Ансаф Ирекович

НЕЧЕТКИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МАРКОВСКИЕ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ОТКАЗОВ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ,
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ГТД

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.10.2011. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 354

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