

**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«АЗЕРБАЙДЖАН ХАВА ЙОЛЛАРЫ»
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ**

На правах рукописи

АБДУЛЛАЕВ ПАРВИЗ ШАХМУРАД оглу

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

**по специальности 3352.01 - Эксплуатация воздушного
транспорта**

БАКУ – 2014

Работа выполнена в Национальной Академии Авиации
Закрытого Акционерного Общества «Азербайджан Хава Йоллары»

Научный консультант:

д.ф.-м.н., академик,
заслуженный деятель науки Азербайджана,
лауреат Государственной Премии

А.М. ПАШАЕВ

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор

Р.М. Джафарзаде

д.т.н., профессор

З.Х. Керимов

д.т.н., профессор

Т.М. Гасымзаде

Ведущая организация: Институт Систем Управления
Национальной Академии Наук
Азербайджана

Защита состоится “_19_”_09_2014 г. в _____ часов на заседании
Диссертационного совета D 06.001 при Национальной Академии
Авиации по адресу: AZ1045, г.Баку, Бина, 25-й км, Национальная
Академия Авиации

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной
Академии Авиации.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета D 06.001
д.ф. по технике, доцент

С.Б. Габидуллаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Одним из основных направлений повышения уровня безопасности и регулярности полетов в гражданской авиации является эффективное использование авиационной техники (АТ), которое подразумевает необходимость совершенствования как структуры и технологических процессов системы технической эксплуатации, так и ее отдельных элементов, обуславливающие раннее обнаружение предотказных состояний высоконагруженных элементов летательных аппаратов.

Одним из изделий АТ, техническое состояние которого в значительной мере определяет уровень безопасности полетов, является авиационный газотурбинный двигатель (ГТД), который представляет собой сложную динамическую систему. Эксплуатация ГТД в течение срока службы требует постоянного контроля за его состоянием, эффективность которого зависит от уровня совершенства методов и средств диагностирования и инфраструктуры обработки информации. Контроль ТС ГТД обеспечивается рациональным выбором методов и систем обработки информации в соответствии с задачами диагностирования и прогнозирования состояния двигателя, позволяющим эффективно решать задачи по управлению эксплуатацией двигателя и осуществлять поддержку принятия решений.

В связи с этим большое внимание уделяется развитию теории и практики систем диагностирования ГТД, которое выражается в совершенствовании их методов и средств, а также в обеспечении эффективного использования полученных результатов оценки ТС ГТД и опыта эксплуатации.

Проблемы и теоретические основы контроля и диагностирования ТС ГТД были широко исследованы в работах А.М.Ахмедзянова, И.А.Биргера, Н.Г.Дубравского, С.В.Жернакова, С.В.Епифанова, И.В.Егорова, Н.Н.Сиротина, А.П.Тунакова, А.Я.Черкеза, Л.А.Урбана, А.Ж.Волпони, Т.Бротертонна, Х.Деполда, Д.Л.Доэла, Р.Юсташа, Р.Гангули, А.Зедды, Р.Сингха, Т.Кобаяши, Д.Саймона, К.Метиодакиса, Ж.Л.Меррингтона, М.Ж.Провоста и др.

Несмотря на значительный объем опыта и исследований в данной области, существующие системы диагностирования ТС ГТД построены на базе обособленных и ограниченных методов, моделей и алгоритмов и не позволяют раскрывать весь потенциал существующей

эксплуатационной информации, баз данных и знаний. В связи с этим, возникают большие проблемы при комплексной обработке и интерпретации разнородной доступной информации, что приводит к уменьшению эффективности подобных систем в эксплуатации ГТД.

Применение индивидуальных или ограниченно гибридизированных методов диагностирования с интеллектуальными элементами позволяет частично устранять указанные недостатки и повысить надежность решений о ТС ГТД. Но при этом перед исследователями возникают проблемы корректной интеграции различных методов и моделей в единой системе диагностирования ГТД, а также их реализация в регулярной эксплуатации. Следовательно, комплексное применение методов искусственного интеллекта, статистического обучения и распознавания, а также информационных технологий при решении задач интеграции является основной проблемой на пути интеллектуализации процессов диагностирования и управления ТС АТ.

Таким образом, основными направлениями исследований, определяющими повышение качества принимаемых решений по эксплуатации ГТД, следует считать интеллектуализацию интеграционных процессов различных методов и моделей обработки разнородной информации с привлечением методов интеллектуального анализа данных, а также информационных процессов в единой системе баз данных и знаний. При этом создание интеллектуальной системы диагностирования и управления ТС ГТД включает в себя разработку соответствующих методологий, методов, методик, алгоритмического и программного обеспечения, позволяющих повысить эффективность решения задачи управления эксплуатацией ГТД по техническому состоянию.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, посвященной созданию системы диагностирования и управления технического состояния ГТД на основе интеллектуализации интеграции и ассоциации различных методов и моделей интеллектуальной обработки данных и знаний, является актуальной.

Данная работа выполнялась в период с 2001 по 2013 гг. на кафедре «Летательных аппаратов и авиационных двигателей» Национальной Академии Авиации (г.Баку, Азербайджан,) в рамках госбюджетных НИР АТМ-1 в соответствии с планом научно-исследовательских работ АН Азербайджанской Республики на 2001-2013 гг.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка научно-обоснованных принципов, методов и алгоритмов интеллектуализации процессов диагностирования и управления ТС ГТД на основе интеграции и ассоциации методов интеллектуального анализа данных и знаний.

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

- 1) сравнительный анализ моделей и методов диагностирования современных ГТД в целях разработки концепции и методологических основ интеллектуализации систем комплексной оценки ТС ГТД;
- 2) разработка стратегии применения различных индивидуальных методов при интеллектуальной оценке ТС ГТД с учетом имеющейся информации;
- 3) разработка метода интеграции моделей оценки ТС ГТД на основе статистических методов распознавания, обучения и технологий искусственного интеллекта;
- 4) разработка моделей синтеза информации о ТС ГТД на основе вероятностно-статистического подхода и методов искусственного интеллекта;
- 5) разработка метода синтеза моделей оценки и классификации ТС ГТД с применением методов статистического обучения и искусственного интеллекта;
- 6) разработка методов синтеза классификаторов и классов ТС ГТД на основе имеющейся полетной и эксплуатационной информации;
- 7) разработка и исследование эффективности гибридных методов для интеллектуальной системы диагностирования ГТД.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

- 1) методология по интеллектуализации систем комплексного диагностирования ТС ГТД;
- 2) стратегия применения индивидуальных методов интеллектуальной оценки ТС ГТД с учетом имеющейся информации;
- 3) метод интеграции моделей оценки ТС ГТД на основе статистических методов распознавания, обучения и технологий искусственного интеллекта;
- 4) модели синтеза информации о ТС ГТД на основе Байесовского подхода, нечетких сетей доверия и теории свидетельств Демпстера-Шефера;
- 5) методы синтеза моделей оценки и классификации ТС ГТД с применением статистического обучения и искусственного интеллекта;

6) система синтеза классификаторов и классов ТС ГТД с применением технологий обучения и голосования на основе имеющейся полетной и эксплуатационной информации;

7) результаты исследования гибридных методов оценки ТС ГТД, являющихся основой интеллектуализированной комплексной системы диагностирования состояния авиационных двигателей.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации.

Обоснованность предложенной концепции интеллектуализации комплексной системы диагностирования и управления ТС ГТД обусловлена проведенным системным анализом предметной области, учетом основных факторов, влияющих на процессы функционирования двигателя, требований и возможностей современной науки, сопутствующими новыми информационными технологиями для решения задач управления ГТД по техническому состоянию. Она подтверждается корректностью основных положений, принятых при построении основных моделей комплексной системы диагностирования и управления ТС ГТД.

Методы исследования

Поставленные в диссертационной работе задачи решены с использованием методов системного анализа, теории технической диагностики, теории авиационных ГТД, теории вероятностей и математической статистики, теории распознавания образов и машинного обучения, методов искусственного интеллекта, теории принятия решений и экспертных систем, теории и практики технической эксплуатации ВС.

Экспериментальной базой являлись:

- воздушные судна и их силовые установки, эксплуатирующиеся в условиях «SilkWay Technics» (г. Баку, Азербайджан);
- средства регистрации полетной информации;
- статистические данные по отказам и неисправностям, а также изменению технического состояния двигателей различных типов самолетов в эксплуатации;
- компьютеры типа IBM PC (на основе операционной системы Windows XP), пакеты прикладных программ MathWorks Matlab 7.0.1 и MathSoft Statistica 6.0 для обработки полетной и эксплуатационной информации о работе ГТД.

Научная новизна результатов:

Новыми научными результатами, полученными в работе, являются модели, методы и алгоритмы комплексного

диагностирования и управления ТС ГТД, направленные на интеллектуализации эксплуатации и повышение показателей надежности различных типов двигателей и уровня безопасности полетов:

- 1) Поставлены и решены проблемы разработки методологических основ интеллектуализации комплексных систем диагностирования ГТД, базирующиеся на методах классической и современной математической статистики и технологии искусственного интеллекта.
- 2) Предложена стратегия интеллектуальной оценки ТС ГТД с использованием комплекса индивидуальных методов диагностирования на основе имеющейся информации.
- 3) Разработан метод интеграции моделей диагностирования ГТД с использованием статистического распознавания, обучения и технологий искусственного интеллекта анализа полетной информации, эксплуатационных данных и знаний о техническом состоянии двигателя.
- 4) Предложены модели принятия решений по управлению ТС ГТД на основе обработки и синтеза информации с применением Байесовского подхода, нечетких сетей доверия и теории свидетельств Демпстера-Шефера.
- 5) Разработан подход по синтезу моделей оценки и классификации ТС ГТД на основе имеющейся информации с использованием современной математической статистики и искусственного интеллекта.
- 6) Предложена система комбинирования классификаторов и классов ТС ГТД с применением технологий обучения и голосования на основе полетной и эксплуатационной информации.
- 7) Разработаны и исследованы гибридные методы комплексной интеллектуальной оценки ТС ГТД в условиях неопределенности с применением математической статистики, нейронных сетей, нечеткой логики и термогазодинамической модели двигателя.

Практическая ценность работы

Практическая значимость результатов диссертационной работы определяется тем, что использование предложенной в ней концепция интеллектуализации систем диагностирования ТС ГТД позволит сократить затраты в процессе технической и летной эксплуатации за счет более полного использования всей доступной априорной и апостериорной информации о работе двигателя, автоматизации процессов обработки и анализа данных, применения методов

статистического распознавания образов и обучения, в том числе технологий искусственного интеллекта на всех этапах оценки технического состояния двигателей и принятия решений.

Разработаны структура и методика диагностирования и прогнозирования ТС ГТД, применение которых позволяет существенно повысить качество и эффективность принимаемых решений о ТС ГТД.

Разработана и внедрена в эксплуатационном подразделении гражданской авиации Азербайджанской республики («SilkWay Technics», г. Баку) нечетконейростатистическая методика оценки и прогнозирования состояния двигателя, позволяющая решать широкий спектр практических задач по управлению ТС ГТД.

Внедрение и реализация результатов работы

Разработанные в результате данных исследований методика комплексной системы диагностирования на основе нечетконейростатистического подхода и алгоритмы интеллектуальной системы диагностирования и управления ТС ГТД прошли испытания в SilkWay Technics (г.Баку, Азербайджан) и рекомендованы к производству технической эксплуатации различных типов двигателей. Результаты были также внедрены в учебный процесс Национальной академии авиации (г.Баку, Азербайджан) в курсе “Диагностика авиационной техники”, в курсовом и дипломном проектировании при подготовке инженеров по специальностям Т070300-«Техническая эксплуатация летательных аппаратов и их двигателей» и 050614-«Инженер по эксплуатации авиатехнического оборудования».

Апробация работы

Основные положения, представленные в диссертационной работе, докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 39 Республиканских, Всероссийских и Международных симпозиумах, конференциях и семинарах, в том числе на:

ASME Turbo Expo 2003, 2003 International Joint Power Generation Conference (GT2003) (June 16–19, 2003, Atlanta, Georgia, USA); International Conference “RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION” - RelStat’03 (16-17 October, 2003, Riga, Latvia); Milli Elmlər Akademiyasının akademiki Arif Mir Cəlal oğlu Paşayevin anadan olmasının 70-illiyinə həsr olunmuş "Mülki Aviasiyanın Müasir Problemləri" Respublika Elmi-Texniki Konfransı (3-4 fevral, 2004-cü il, Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan); International Conference on Computational Intelligence -

ICCI 2004 (27-29 May, 2004, Nicosia, North Cyprus); 7th Biennial ASME Conference Engineering Systems Design and Analysis (19-22 July, 2004, Manchester, UK); AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference (Chicago, Illinois, USA, 20-22 September, 2004); XII Всероссийская Межвузовская Научно-Техническая Конференция “Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели”, посвященная 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана и 55-летию кафедры Э-3 (24-26 ноября 2004, Москва, Россия); 3-я Международная Конференция “Авиация и Космонавтика-2004” (1-4 ноября 2004 г., МАИ, Москва, Россия); Международная Научно-Техническая Конференция “Авиационно-техническая техника и технология”, посвященная 75-летию Национального Аэрокосмического Университета им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт” (25-27 мая 2005г., Харьков, Украина); X Международный Конгресс Двигателестроителей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”, Национальный Технический Университет “ХПИ”, ГП “Ивченко-Прогресс”, ОАО “АВТРАМАТ” (13-18 сентября 2005г., Харьков-Рыбачье, Украина); ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air - GT2005 (June 6–9, 2005, Reno, Nevada, USA); AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), 16th Lighter-Than-Air Systems Technology Conference and Balloon Systems Conference (Arlington, Virginia, Sep. 26-28, 2005); Научно-технический конгресс по двигателестроению, 9-й Международный Салон «Двигатели-2006» (11-15 апреля 2006 г., Москва, Россия); II Международная Научно-Техническая Конференция “Авиадвигатели XXI века”, Москва, Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова, (6-9 декабря 2005 г., Москва, Россия); ASME 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis-ESDA2006 (July 4–7, 2006, Torino, Italy); ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition- IMECE2007 (November 11–15, 2007, Seattle, Washington, USA); 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference- ATIO (Wichita, Kansas, USA, Sep. 25-27, 2006); 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (Cincinnati, OH, USA, July 8-11, 2007); 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition (21 - 23 Jul 2008, Connecticut Convention Center, Hartford, CT, USA); 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference (19-22 October 2009, Atlantic Hotel

Galopprennbahn, Bremen, Germany); International Symposium of Mechanism and Machine Science, AzC IFToMM 2010 (October 5-8, 2010, Izmir Institute of Technology, Urfa, Izmir, Turkey); ISABE 2011 20th Conference, Sustainable and Competitive Aero Engine Research and Technology (September 12-16, 2011, Gothenburg, Sweden); International Symposium on Advances in Applied Mechanics and Modern Information Technology (22-23 September 2011, Baku, Azerbaijan). Материалы диссертации также обсуждались в течение ряда лет (2001-2013 гг.) на научно-технических семинарах, проводимых в Национальной академии авиации (г. Баку, Азербайджан).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 75 печатных трудах.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и приложения. Содержит 213 страниц машинописного текста, в том числе 90 рисунков, 47 таблиц и список цитируемой литературы в количестве 316 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, изложены цель и задачи исследований, приведены научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния и перспективам развития систем диагностирования (СД) авиационных ГТД. Обобщены материалы, характеризующие основные методы и модели систем диагностирования авиационных ГТД, которые направлены на создание современных систем по управлению состоянием двигателей. Приведены современные представления о состоянии теории и методов исследования, характеризующих создание интеллектуальных систем диагностирования и управления ТС ГТД с применением классических и современных математических аппаратов. Показана роль диагностирования авиационных ГТД в системе эксплуатации воздушных судов и новые достижения в современной науке и технике, в том числе методах и технологиях, которые позволяют снижать себестоимость реализации СД ГТД (рис.1).

Приведена статистика эксплуатации ВС, которая подтверждает необходимость эффективного использования двигателей и правильной

организации структуры расходов на их техническую эксплуатацию, обуславливающую развитие СД ГТД (рис.2).

Приведен анализ основных методов, моделей диагностирования и особенности использования регистрируемых функциональных параметров авиационных ГТД.

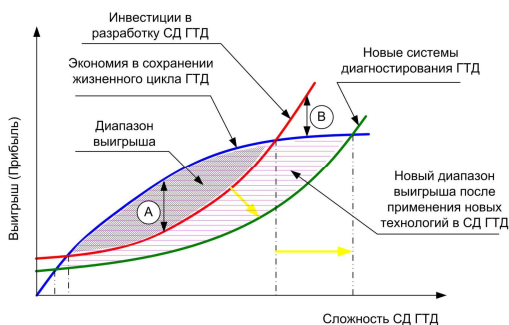


Рис.1. Экономический эффект применения СД ГТД с учетом новых технологий: А и В — положительный и отрицательный эффект применения СД ГТД

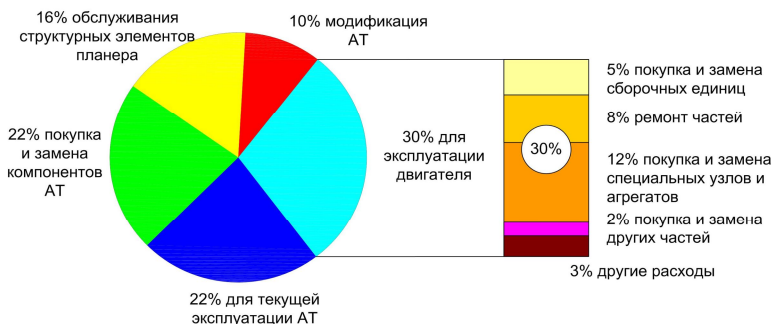


Рис.2. Распределение расходов эксплуатанта для поддержания летной годности авиационной техники

Обобщение основных характеристик существующих методов диагностирования показывает, что ни один из них не обеспечивает полного выявления всех неисправностей и отказов, возникающих в двигателе в процессе эксплуатации. С учетом особенностей применяемых методов была показана сравнительная характеристика моделей с точки зрения их сложности (рис.3.) и их оценка по пятибалльной шкале (табл.1).

На основе проведенного анализа показаны принципиальные особенности перспективных СД ГТД с высоким уровнем интеллектуализации:

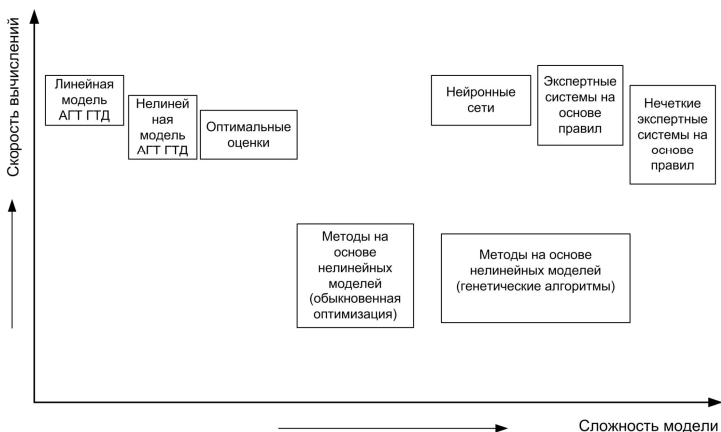


Рис.3. Сравнительный анализ методов диагностирования ТС ГТД

Таблица 1. Оценка моделей диагностирования ТС ГТД по пятибалльной шкале

Модели	Точность		Скорость		Надежность		Возможность синтеза данных	Гибкость
	ОН	МН	ОН	МН	Шум	Малое кол-во измерений		
Линейная модель АГТ	1.5	1.5	5	5	1.5	1.5	1.5	5
Нелинейная модель АГТ	1.5	2	5	5	1.5	1.5	1.5	5
Взвешенные наименьшие квадраты, фильтр Калмана	2	3	5	5	2.5	3	3	3
Расширенный фильтр Калмана, Итерационный расширенный фильтр Калмана	2.5	3.5	4	4	2.5	3	3	3
Нейронные сети	4	2	5	4*	3.5	4	3.5	1.5
Генетические алгоритмы	4	3	3	1.5	4	4	3.5	3
Нечеткая логика	4	2	3	1.5	3.5	4	4	2.5
Байесовские сети доверия	3	1.5	4	2.5	4	4	4.5	2.5

Примечание: (ОН-одиночные неисправности, МН-множество неисправностей, 1-очень плохо, 5-очень хорошо, *НС показывает хорошие результаты, но требуется большое время на обучение)

- Основа системы - как линейные, так и нелинейные модели ГТД;
- Способность с достаточной степенью точности обнаруживать даже небольшие изменения в показателях состояния ГТД;
- Возможность оперирования с шумами измерения и смещениями

датчиков ГТД;

- Возможность диагностирования с высокой степенью точности при числе измерений меньше, чем количество параметров состояния ГТД - ($N > M$);
- Возможность локализации одного или нескольких неисправностей ГТД;
- Способность избегания эффекта размытия и концентрации на фактической неисправности ГТД;
- Нет необходимости в подготовке и настройке неопределенностей, сложностей и зависимостей для регулирующих параметров;
- Система независима от детерминированной модели ГТД, следовательно, имеет возможность синтеза данных и сокращения вычислительной времени;
- Возможность синтеза различных моделей и классификаторов ТС ГТД.
- Возможность внедрения знаний различных экспертов по физическим и параметрическим методам диагностирования ГТД.

С учетом вышеизложенного, была отмечена необходимость интеллектуализации систем диагностирования ГТД, позволяющая интегрировать и организовать синтез разных методов, моделей и алгоритмов диагностирования, в том числе и полученных результатов.

Во второй главе рассмотрены особенности применения диагностических моделей, базирующиеся на методах искусственного интеллекта - нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов, а также вейвлет-анализов при оценке ТС ГТД.

В первом параграфе представлены результаты исследований по возможности применения различных типов нейронных сетей (НС) в задачах классификации и диагностирования состояния ГТД.

Показана необходимость применения сетей с прямым распространением сигнала (НСПРС), которые обладают гибкой и полиморфной структурой. Исследованиями было показано, что для организации эффективной архитектуры НСПРС целесообразно предварительное эмпирическое формирование крутизны гиперболических функций активации нейронов скрытого и выходного слоев с помощью регрессионного анализа в виде $\alpha_{ск} \approx f(K_{ОШ}^T, K_{ОШ}^O, U_{вх})$, $\alpha_{вых} \approx f(K_{ОШ}^T, K_{ОШ}^O, U_{вых})$, где $U_{вх}$, $U_{вых}$ - размер входного и выходного пространства сети, $K_{ОШ}^O$ и $K_{ОШ}^T$ - коэффициенты качества распознавания классов (или расчетных точек

в классах) учебного и тестового набора данных двигателя. Далее, для решения задачи разработки эффективной нейромодели ТС ГТД при существующих значениях $\alpha_{ск}$ и $\alpha_{вых}$ на основе проведенных экспериментальных исследований было сформировано требование по применению комбинированных алгоритмов обучения НС с использованием градиентных и квазиньютоновых алгоритмов обучения, а также сопряженных градиентов.

Во втором параграфе приведен анализ особенностей применения динамических НС (ДНС) в диагностировании и прогнозировании ТС ГТД, которые позволяют аппроксимировать и прогнозировать выходной сигнал в зависимости от времени (или наработки двигателя). Исследованы возможности применения сетей Эльмана и TDNN в задачах аппроксимации и оценки параметров ГТД. Экспериментально установлено, что такие статистические характеристики как асимметрия $A(P)$, эксцесс $E(P)$ функциональных параметров ГТД очень чувствительны к развивающимся неисправностям и могут быть успешно использованы при формировании различных моделей двигателей, в том числе для формирования архитектуры ДНС. В качестве выходного параметра TDNN целесообразно принять тот, для которого $|A(P)| \rightarrow 0$ или $|E(P)| \rightarrow 0$, а в качестве входных параметров ДНС рекомендуется принять параметры ГТД, имеющие между собой корреляционные связи $r_{ij}(P) < 0.7$. Исследованиями было показано, что дальнейшая оценка ТС ГТД с применением ДНС может быть произведена на основе новых условий: формирование эмпирических нейропорогов

$$U_{II}^B = P_n + P_6 \cdot \alpha_{13}, \quad U_{II}^H = P_n - P_6 \cdot \alpha_{23}$$

и сравнения их с прогнозируемыми значениями рассматриваемого функционального параметра, где P_n - значение прогнозируемого параметра в зависимости от шага аппроксимации, P_6 - базовое значение прогнозируемого параметра и α_3 - нейропороговый коэффициент, значение которого устанавливается на основе предварительной обработки эксплуатационной информации о работе ГТД.

Третий параграф посвящен применению нечеткой логики (НЛ) в задачах диагностирования ГТД, где, в отличие от НС не требуются трудоемкие процессы обучения.

Рассмотрены особенности разработки системы НЛ (СНЛ), которая подразумевает нелинейное отображение входного вектора отклонений значений параметров ГТД на скалярный выход. Типичная СНЛ с множеством входов и единичным выходом представляет собой отображение пространств $V \in R^m$ к $W \in R$: $f: V \in R^m \rightarrow W \in R$, где $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \in R^m$ - входное пространство, $W \in R$ - выходное пространство. Правила для СНЛ могут быть сформулированы на основе опыта экспертов или извлечены из числовых данных (отклонений параметров ГТД) в виде коллекции **Если-Тогда** заявлений, что подразумевает применение квантования и логического соединения лингвистических переменных, а также импликации выводов. При этом требуется комбинировать несколько правил, которые могут выражаться как R_i : Если x_1 есть F_1 И x_2 есть F_2 И ... x_m есть F_m ТОГДА $y = C_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, M$, где m и M - число входных переменных и правил, x_i и y - входные и выходные переменные, $F_i \in V_i$ и $C_i \in W$ - нечеткие множества, характеризующиеся соответствующими функциями принадлежности $\mu_{F_i}(x)$ и $\mu_{C_i}(x)$.

В четвертом параграфе рассмотрены особенности применения генетических алгоритмов (ГА) к задачам диагностирования ГТД в виде решения уравнения $\hat{z} = f(\hat{x}) + \hat{\varepsilon} + \hat{\mu}$, где \hat{z} - вектор измерений, \hat{x} - вектор параметров состояния ГТД, $\hat{\varepsilon}$ - вектор шумов измерений, $\hat{\mu}$ - вектор отклонений или смещений данных датчиков. Причем приспособленность особей приведена в виде:

$$F_{\text{fitness}} = \sum \frac{(\hat{z}_{\text{obs}} - \hat{z}_{\text{pred}})^2}{\hat{z}_{\text{pred}}^2}$$

где \hat{z}_{obs} - вектор текущих измерений, \hat{z}_{pred} - заранее рассчитанный (прогнозируемый) вектор, полученный на основе определения \hat{x} с помощью ГА. Очевидно, для расчета \hat{z}_{pred} требуется определенная модель двигателя, которая может быть сформирована на основе регрессионного анализа доступной эксплуатационной (или полетной) информации в виде

$$Y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j, \quad i = \overline{1, m},$$

где Y_i - выходной параметр модели (диагностируемый параметр ГТД),

x_j -входные параметры модели ТС ГТД, a_{ij} -коэффициенты, идентифицируемые с помощью регрессионного анализа, $a \in [a_{\min}, a_{\max}]$.

Показана необходимость оптимизации процесса диагностирования ГТД на основе данных различных точек эксплуатации и режимов работы двигателя, которая позволяет решать проблему недостаточности количества датчиков. Достоверность выбора точки эксплуатации, с точки зрения получения высокой точности результатов, может быть проверена условиями

$$|A(P)| \rightarrow 0, |E(P)| \rightarrow 0 \text{ или } |A(P)| \rightarrow |A(P)_{\min}|, |E(P)| \rightarrow |E(P)_{\min}|.$$

В пятом параграфе проанализированы концептуальные направления применения Фурье- и вейвлет-анализов в обработке сигналов авиационных ГТД.

Показано, что реальные сигналы ГТД имеют частотные составляющие, которые варьируются во времени: динамическое давление газоздушного потока на различных сечениях ГТД (2-200Гц) в зависимости от различных внутренних и внешних факторов. Корректный анализ такого рода сигналов может быть осуществлен за счет кратковременного Фурье-преобразования (КФП). Однако КФП имеет свойство только единого разрешения на плоскости время-частота, что обуславливает применения Вейвлет-преобразования (ВП). Тогда ВП - $W_f(a, b)$ для функции $f(t)$ будет как

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

где a - частотный параметр, означающий масштабирование функции $\psi(t)$, b - сдвиг (перемещение или перенос) функции. Отсюда получается рамка ВП

$$[b - a\Delta\psi(t), b + a\Delta\psi(t)] \times \left[\frac{\pm \omega_0 - \Delta\Psi(\omega)}{a}, \frac{\pm \omega_0 + \Delta\Psi(\omega)}{a} \right]$$

Исследованиями подтверждено, что ВП-анализ имеет хорошее локальное временно-частотное свойство и является желаемым инструментом при диагностировании ГТД в интеграции других методов, в том числе при очистке сигналов ГТД от шума, обнаружении особенностей (сингулярностей) в сигналах ГТД, обнаружении неисправностей ГТД, мониторинге тенденции полезных сигналов ГТД и характеристики мультифракталов.

Третья глава посвящена вопросам разработки методов синтеза различного типа эксплуатационной и полетной информации в целях интеллектуализации систем диагностирования и управления ТС ГТД, с применением Байесовского подхода, теории Демпстера-Шефера и основ нечеткой логики.

В первом параграфе представлена общая концепция систем управления техническим состоянием (СУТС) авиационных двигателей с учетом уровня их интеллектуализации и оснащенности передовыми сенсорными технологиями. Обосновано создание эффективной СУТС, которая

предусматривает синтез информации на уровнях датчиков, признаков (или показателей) и принятия решений.

Второй параграф посвящен общей стратегии синтеза информации в СУТС ГТД с применением нечетких правил и Байесовского подхода.

Отмечено, что центральным элементом СУТС ГТД является модель синтеза информации (СИ), которая должна охватывать весь перечень и иерархию неисправностей. Предложена структура системы СИ (рис.4), которая организована в многоуровневом виде и интегрирована в состав СУТС ГТД как submodule, оперирующий различными источниками информации (например, измерения T_4^* , G_T , n_1 , n_2 ,

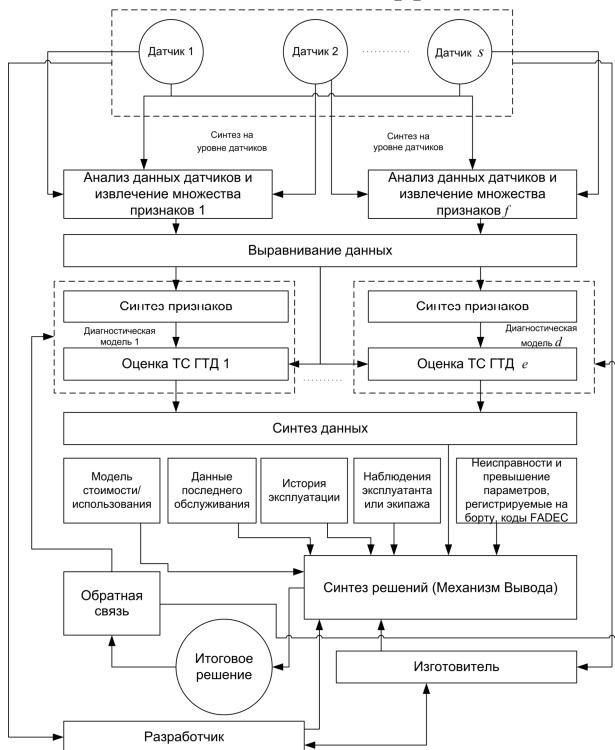


Рис.4. Структурная схема СИ в СУТС ГТД

история эксплуатации, информация FADEC-а и т.п.).

Рассмотрен порядок формирования иерархической древовидной структуры неисправностей для систем двигателя, которая позволяет более четкое распределение неисправностей ГТД среди диагностических моделей (рис.5). При реализации такой иерархии и принятия решения Байесовский механизм вывода является эффективным инструментом для синтеза информации. При этом априорные вероятности определяются для всех первичных узлов сети,

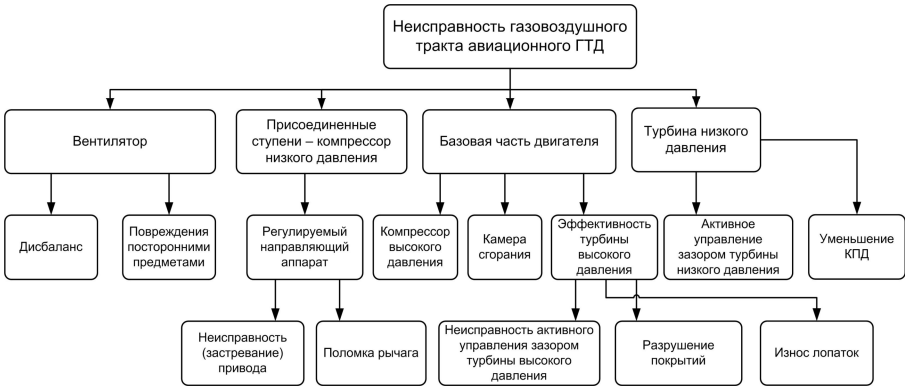


Рис.5. Древовидная иерархическая структура неисправностей различных узлов газозвдушного тракта ГТД

а совместные вероятности всех переменных A_i (оценки ТС ГТД) или универсума $U = \{A_1, \dots, A_n\}$ сети рассчитываются с помощью формулы

$$P(U) = P(A_n / A_1, \dots, A_{n-1}) P(A_{n-1} / A_1, \dots, A_{n-2}) \dots P(A_2 / A_1) = \prod_i P(A_i / pa(A_i))$$

где $pa(A_i)$ -множество вероятностей родительских узлов A_i . В случае, когда появляются новые свидетельства e_1, \dots, e_m для подмножества S универсума U , то апостериорная вероятность для остальных переменных может определяться по формуле

$$P(A / e) = \frac{\sum_S P(U, e)}{P(e)}, \quad P(U, e) = \prod_{A \in U} P(A / pa(A)) \cdot \prod_{i=1}^m e_i, \quad \text{где } S = U \setminus \{A\}.$$

Однако применение Байесовских сетей доверия (БСД) затрудняется из-за неточных оценок условных вероятностей для каждого признака неисправностей на основе данных датчиков. Следовательно, возникает необходимость в формировании для каждой причинно-следственной связи таблицы условных вероятностей, полученных на

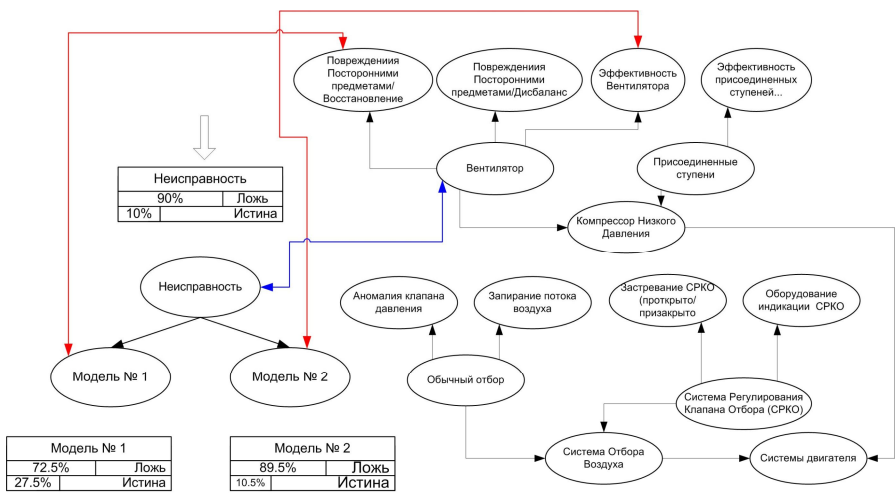
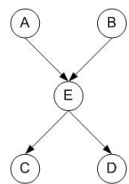


Рис.6. Структура Байесовской сети доверия для синтеза информации от двух различных моделей (для вентилятора)

основе синтеза выходов различных диагностических моделей (рис.6). Полученные значения условных вероятностей неисправностей двигателя включаются в БСД-модель и распространяются на всю сеть, что позволяет оценить апостериорные вероятности неисправных состояний ГТД.

В отличие от второго уровня синтеза СУТС ГТД, который зависит от человеческого интерфейса, первый уровень может функционировать и в режиме реального времени во время полета. Здесь подходящей альтернативой БСД могут выступать нечеткие сети доверия (НСД), которые являются комбинацией теорий вероятностей и графов.

Так, например, для приведенной 5-и узловой сети влияния $A \Rightarrow E$ и $B \Rightarrow E$ исходят от наблюдения A и B . Если наблюдается только A , то обновление будет за счет влияния $A \Rightarrow E$. Здесь каждое переменное (узел) имеет два состояния: «присутствие» или «отсутствие» состояния рассматриваемого объекта. Таким образом, пусть значение нечеткого доверия о том, что “ A ” присутствует, будет как f_A . Функцию нечеткого доверия для распространения доверий от переменного X к родителям (или потомкам) Y обозначим как f_{XY} , который задается сигмоидом с центром b и степенью влияния a . Для



входа x_0 нечеткий уровень выходного доверия задается функцией сигмоида (функция Цукамото) в виде

$$f_{XY} = \frac{1}{1 + e^{-a(x_0 - b)}}, \quad 0 \leq x_0 \leq 1$$

Тогда для рассматриваемой сети, если только наблюдается один узел A , то в узле E обновленное нечеткое доверие будет $f_{E^*} = \alpha f_{AE}(f_A) + (1 - \alpha) f_E$, где $\alpha \in [0, 1]$.

Здесь f_{E^*} - новое обновленное значение нечеткого доверия для узла E , $f_{AE}(\cdot)$ - функция принадлежности нечеткому множеству влияния A к E , f_A - наблюдаемое нечеткое доверие состояния A и f_E - предыдущее значение доверия для E . Если для обновления узла E одновременно используется A и B , тогда нечеткое доверие в узле E будет как

$$f_{E^*} = \alpha f_{AE}(f_A) + \beta f_{BE}(f_B) + \gamma f_E, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1$$

Синтез данных в СУТС ГТД с помощью НСД позволяет обеспечивать интеграцию данных и информации от многообразных источников, что преследует расширение возможностей оперативного диагностического наблюдения и управления техническим состоянием двигателя, увеличения надежности диагностирования и уменьшения числа ложных диагностических сигналов.

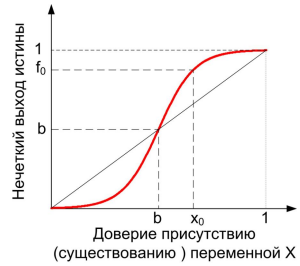
В третьем параграфе приведена альтернативная стратегия синтеза информации в СУТС ГТД с применением теории Демпстера-Шефера (ТДШ), которая характеризуется меньшими вычислительными ресурсами.

Согласно ТДШ уверенность в конкретных гипотезах A о ТС ГТД представляется функциями доверия и привлекательности (правдоподобия), которые определяются следующим образом:

$$Bel(A) = \sum_{\emptyset \neq B \subseteq A} m(B), \quad \forall A \subseteq \theta,$$

$$Pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) = 1 - \sum_{B \subseteq \bar{A}} m(\bar{B}) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B), \quad \forall A \subseteq \theta,$$

где $Bel(A)$ - массовая сумма доверия подмножеств A или оценка доверия A , т.е. мера полного количества веры в A и в его подмножества; $Pl(A)$ - массовая сумма недоверия подмножеств A или оценка привлекательности, т.е. мера правдоподобия. При этом



интервал свидетельств определяется как $EI(A) = [Bel(A), 1 - Bel(\bar{A})]$, т.е. $Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A)$. Оценки сомнения и игнорирования (или неосведомленности) рассчитываются по формулам $Dbt(A) = Bel(\bar{A}) = 1 - Pl(A)$, $Igr(A) = Pl(A) - Bel(A)$. Таким образом, свидетельства в виде подмножеств X и Y комбинируются по правилу Демпстера как ортогональная сумма двух масс :

$$m_1 \otimes m_2(A) = k \sum_{X \cap Y = A \neq \emptyset} m_1(X)m_2(Y), \quad k = 1 / (1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)),$$

где k - константа нормализации (мера конфликта между двумя наборами масс). Основной проблемой применения ТДШ является назначение массам доверия m значения на основе предоставленной информации от различных источников (или датчиков). С этой целью в определенном интервале времени $[t_i, t_{i+1}]$ на основе ряда значений асимметрии в упрощенном виде можно формировать массу доверия для соответствующего параметра в виде $m_p = A_{p,cp} / A_{p,max}$, где $A_{p,cp}$, $A_{p,max}$ - среднее и максимальное значение коэффициента асимметрии параметра за четыре последних измерения.

В четвертом параграфе рассматриваются особенности предварительной подготовки перед синтезом информации в СУТС ГТД.

Отмечено, что в процессе синтеза особое значение имеют специальные алгоритмы для: 1) выравнивания данных для синхронизации исходной информации ГТД (5Гц-50кГц) к общей степени семплирования, 2) обнаружения аномалий газовоздушного тракта на основе банка эмпирических моделей, 3) эмпирического моделирования систем ГТД с помощью регрессионного анализа или нейронных сетей на основе значений регистрируемых параметров в простом линейном виде $y(t) = c_1x_1(t) + c_2x_2(t) + \dots + c_px_p(t)$, где $y(t)$ - значения целевой переменной в момент времени t , $x_i(t)$ - соответствующие входные переменные, c_i - весовые коэффициенты для входа, p - количество входных параметров модели.

Четвертая глава посвящена вопросам разработки методов синтеза различных диагностических моделей и классификаторов на основе эксплуатационной и полетной информации в целях интеллектуализации систем диагностирования и управления ТС ГТД.

Предложена ассоциативно-интегрированная структура (рис.7)

синтеза диагностических моделей (ДМ), методов классификации (МК) и классов состояния в составе СУТС ГТД.

В первом параграфе рассматриваются особенности и структура синтеза моделей диагностирования, классификации и классов ТС ГТД. Отмечено, что основными направлениями при синтезе ДМ и МК являются динамический выбор ДМ и МК (ДВДМ), структурирование и группирование ДМ и МК, иерархическое смешивание экспертов по ДМ и МК.

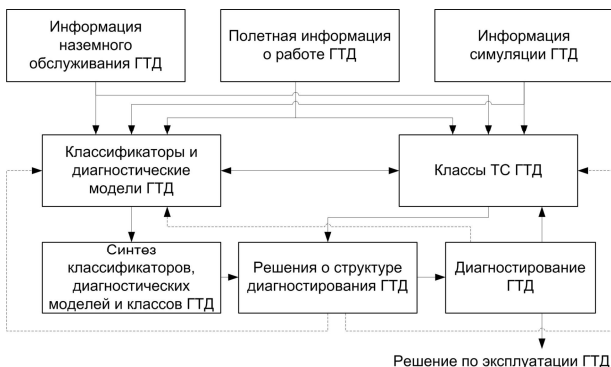


Рис.7. Ассоциативно-интегрированная схема синтеза ДМ и МК и классов состояния ГТД

С помощью ДВДМ на основе обучающих данных определяется такая ДМ, которая в рассматриваемой точке эксплуатации двигателя большей вероятностью производит корректное распознавание ТС

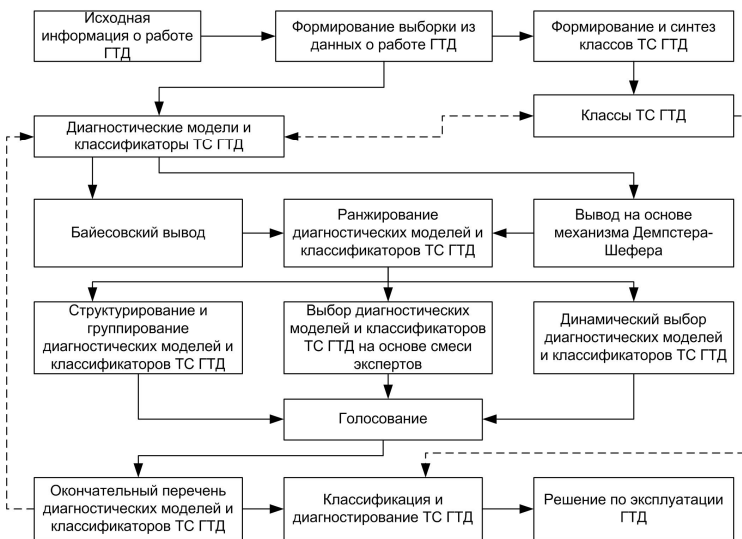


Рис.8. Структура синтеза ДМ, МК и классов состояния ГТД

ГТД. Структурированием и группированием из исходного множества ДМ и МК выделяются однородные группы, обладающие общим сходством по одному или нескольким существенным качественным или количественным признакам. Иерархическое смешивание экспертов (ИСЭ) является одним из методов синтеза и представляет собой технику обучения с учителем, базирующуюся на принцип декомпозиции и концептуально организуется в древовидной структуре (рис.9). Здесь выходы элементов терминального узла разделяются и комбинируются шлюзной (вентильной) сетью. Для входного вектора X и данных (x_i, y_i) , $i=1,2,\dots,N$, где y_i -непрерывный или бинарный отклик, x_i -значения входного вектора, общий выход от узлов т.е. softmax функция для γ будет представлять собой выпуклую комбинацию в виде

$$g_j(x, \gamma_j) = e^{\gamma_j^T x} / \sum_{k=1}^K e^{\gamma_k^T x}, j = 1, 2, \dots, K$$

Здесь γ_j -вектор неизвестных параметров, K -число путей мягкого разделения (на рис.9 $K = 2$). При этом каждая величина $g_j(x, \gamma_j)$ будет присвоенной вероятностью наблюдения для вектора x с рассматриваемым признаком по ветви j . Для второго уровня шлюзные сети будут иметь такую же форму:

$$g_{lj}(x, \gamma_{jl}) = e^{\gamma_{jl}^T x} / \sum_{k=1}^K e^{\gamma_{jk}^T x}, l = 1, 2, \dots, K.$$

Эта величина есть вероятность присвоения l -ой ветви при j -ой ветви верхнего уровня. Для каждого эксперта (терминального узла) переменная отклика в общем будет как $Y \sim P(y | x, \theta_{jl})$. В целях увеличения апостериорной вероятности, рассчитанной с помощью правила Байеса, сеть экспертов по диагностированию ГТД обучается. Далее с применением определенного количества

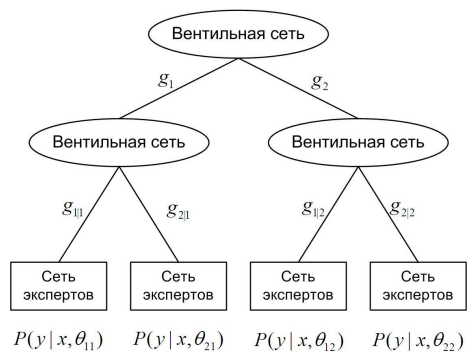


Рис.9. Двухуровневый ИСЭ-синтез ДМ и МК ГТД

алгоритмов обучения производится настройка модели смешивания.

Во втором параграфе разработаны общие принципы синтеза классов ТС ГТД. Показано, что синтез классов обеспечивает процесс комбинации МК и ДМ минимальным количеством полезной информации.

Если каждая ДМ и МК дает единственную метку для класса в качестве выхода и нет доступных данных ГТД для обучения, синтез может быть осуществлен по схеме голосования

$$E(d) = \begin{cases} c_i, & \text{а́ннèè } \forall t \in \{1, \dots, m\} \sum_{j=1}^n B_j(c_t) \leq \sum_{j=1}^n B_j(c_i) \geq \alpha \cdot m + k(d) \\ r, & \text{èíà÷á} \end{cases}$$

где d -вектор решений, $d = [d, d_2, \dots, d_n]^T$, $c_i \in \{c_1, c_2, \dots, c_m, r\}$, c_i -метка i -го класса, m -количество классов, r -отклонение назначения входной выборке любого класса, α -параметр и $k(d)$ -функция, определяющие дополнительные ограничения по голосованию, $B_j(c_i)$ -бинарная характеристическая функция

$$B_j(c_i) = \begin{cases} 1, & \text{а́ннèè } d_j = c_i \\ 0, & \text{а́ннèè } d_j \neq c_i \end{cases}$$

Метод пространства знание-поведение (ПЗП) не требует предварительного условия о независимости решений, принимаемых индивидуальными ДМ и МК ГТД. Если задача синтеза решений формулируется в виде отображения K диагностических моделей e_1, \dots, e_k на M классов состояния ГТД c_1, \dots, c_M , тогда метод будет оперировать K -мерным пространством. Применением ПЗП-метода формируется пересечение решений индивидуальных ДМ и МК в виде единицы ПЗП (фокальная единица) - $ПЗП(e_1, \dots, e_k)$, где e_i -решение i -го эксперта (или ДМ), $e_i \in \Lambda \cup \{M+1\}$. В фокальной единице ПЗП решение принимается согласно правилу

$$E(x) = \begin{cases} R_{e_1 \dots e_k}, & \text{а́ннèè } T_{e_1, \dots, e_k} > 0 \text{ è } \frac{n_{e_1 \dots e_k}(R_{e_1 \dots e_k})}{T_{e_1 \dots e_k}} \geq \lambda \\ M+1, & \text{èíà÷á} \end{cases}$$

где $T_{e_1 \dots e_k}$ и $R_{e_1 \dots e_k}$ -число входных выборок и репрезентативных классов для $ПЗП(e_1, \dots, e_k)$, m -общее число входных выборок для

класса, λ -порог ($0 \leq \lambda \leq 1$), «и»-операция конъюнкции. Здесь процесс настройки модели должен включать в себя автоматическое нахождение порога λ .

Далее в целях уменьшения количества и получения истинного класса приведены методы синтеза на основе ранжирования и переупорядочивания классов ТС ГТД. Показано, что оценка Борда (ОБ) является эффективным инструментом, согласно которой разные ДМ и МК ГТД в системе синтеза имеют разные «голоса» B_j . Для класса c_k оценка $B(c_k)$ определяется как сумма количества классов, ранги которых ниже, чем ранг класса c_k , т.е. ОБ для класса c :

$$B(c) = \sum_{j=1}^m B_j(c)$$

где c -любой класс в множестве S , $B_j(c)$ -число классов в множестве S , которые ранжированы ниже, чем класс c с помощью классификатора C_j ($j=1, \dots, m$). Таким образом, класс, имеющий наибольшую оценку B_j , принимается как окончательный. ОБ-метод не позволяет распознавать качество выходов индивидуальных моделей, что обуславливает применение логистической регрессии.

В третьем параграфе рассмотрены стратегии синтеза нечетких выходов классификаторов и диагностических моделей ТС ГТД.

Показано, что Байесовские методы могут быть применены в синтезе классификаторов и ДМ ГТД в том случае, когда их выходы выражаются апостериорными вероятностями. Тогда, интеграция всех индивидуальных вероятностей может быть произведена в виде оценок

$$P_E(x \in C_i / x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_K(x \in C_i / x), \quad i=1, \dots, m \quad \text{или} \quad P_K(x \in C_i / x) = k_i / k_m,$$

где k_i -количество прототипных выборок из классов C_i среди всех близких друг к другу прототипных выборок k_m .

Приведены теоретические основы применения синтеза выходов классификаторов и диагностических моделей ТС ГТД на основе нечетких интегралов Сугено, Шоке и Вебера в виде

$$\int_A h(x) \circ g(\cdot) = \sup_{E \subseteq X} [\min(\min_{X \in E} h(x), g(A \cap E))] = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\min(\alpha, g(A \cap F_\alpha))]$$

$$\int_A h(x) \circ g(\cdot) = \int_0^{+\infty} g(A_\alpha) d\alpha, \quad e_T = \bigcup_i [T(h(x_i), g(\{x_1, \dots, x_n\}))]$$

Было также отмечено, что другим путем комбинации индивидуальных моделей или экспертов по ТС ГТД является произведения их индивидуальных вероятностей и ренормализации в виде

$$p(d / \theta_1, \dots, \theta_m) = \prod_m p_m(d / \theta_m) / \sum_i \prod_m p_m(c_i / \theta_m),$$

где d - вектор данных в дискретном пространстве, θ_m - все параметры индивидуальной модели m , $p_m(d / \theta_m)$ - вероятность получения d от модели m , i - индекс векторов c_i всех возможных данных.

Приведена также стратегия синтеза выходов классификаторов и диагностических моделей ТС ГТД с применением НС. Сеть, входы которой связаны с выходами индивидуальных моделей, работает как «смеситель» и может быть расширена до определенной большей размерности за счет синтеза нескольких НС.

Четвертый параграф посвящен синтезу классификаторов, моделей и методов в бортовых интеллектуальных системах диагностирования ВС на основе Байесовского подхода.

Показано, что в случае недоступности модели ГТД или ограниченности отдельных моделей и методик, входящих в модули бортовых интеллектуальных систем диагностирования, возможны проблемы оценки качества функционирования двигателя. Это обуславливает

применения наземно-бортовых систем управления данными (УД) при условии, что от системы мониторинга



Рис.10. Структура синтеза диагностических моделей и методов классификации ТС ГТД на основе Байесовского подхода

все еще доступна любая другая информация. В таком случае синтез доступных моделей в формализованном виде представляется в виде (рис.10):

$$P(c_j / x, Z) = \sum_{M_k} P(c_j, d_k(c_j) / x, Z) = \\ = \sum_{M_k} P(c_j / x, Z, d_k(c_j)) P(d_k(c_j) / Z) = \sum_{M_k} e_{ij}(x) P(d_k(c_j) / Z)$$

где $d_k(k=1,2,\dots,L)$ -множество моделей или признаков состояния (например, характеристики распределения параметров - асимметрия, эксцесс), C -классы, $\{t_i\}, (i=1,2,\dots,N)$ -цели, $Z(z_i, i=1,2,\dots,N)$ -множество образов обучения, x - образ тестирования, $e_{jk}(x)$ -апостериорная вероятность класса j , k -номер классификатора для образа x .

Динамический синтез моделей и методов оценки ТС ГТД в реальном масштабе времени был представлен как задача определения множества

$$ДС = \{s, k, D, O, ККО, P, A\},$$

где D -множество доступных моделей бинарной классификации L , S - множество M компонентов (источников неисправностей, классов), связанное с рассматриваемой системой, s -состояние компонента m или характерные признаки (асимметрия, эксцесс) в дискретное время t , ККО-коды корректировки ошибок, k -множество дискретизированных эпох наблюдений, O -бинарные выходы классификаторов или моделей ТС ГТД, A -множество вероятностей появления и не появления неисправности P .

Пятая глава посвящена вопросам разработки системы синтеза методов математической статистики, нейронных сетей, нечеткой логики, фильтра типа Калмана и термогазодинамических моделей двигателей в рамках интеллектуализации систем диагностирования и управления ТС ГТД.

В первом параграфе приведена стратегия диагностирования ТС ГТД, которая базируется на интеграции методов математической статистики и различного типа НСПРС (рис.11).

Основными этапами предлагаемой стратегии диагностирования ТС ГТД на основе НСПРС, являются: 1) формирование первоначальной нейромодели двигателя и предварительная оценка ТС ГТД (для измерений $N \leq 60$), 2) первичное аналитическое моделирование ТС ГТД и формирование порядка «имплантации»

классов в структуру статической НС (СНС), 3) формирование архитектуры СНС с учетом накопленной статистики, 4) опрос сети данными полетной информации и реальных неисправностей двигателей, принятие решения об устойчивости СНС. Дальнейшая оценка ТС ГТД производится с применением методов математической статистики.

Во втором параграфе приведена стратегия диагностирования ТС ГТД, которая базируется на интеграции методов математической статистики и динамических НСПРС (рис.12).

Оценка ТС ГТД с применением ДНС реализуется выполнением следующих

последовательных этапов: 1) формирование входного и выходного пространств ДНС, 2) формирование объема обучающей, тестовой выборки и прогнозируемого интервала на основе условий нестабильности параметров ГТД, 3) выбор стратегии минимизации функционала ошибки на основе комбинированного LM-CGP-алгоритма для обучения ДНС и проверка корректности отображения входного пространства на выходное, 4) наращивание сети (поиска удовлетворительного размера скрытого слоя ДНС).

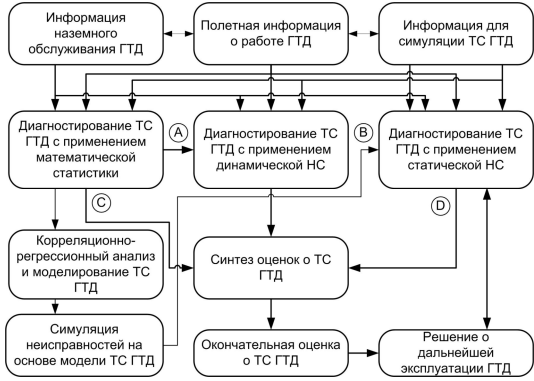


Рис.11. Стратегия диагностирования ТС ГТД на основе математической статистики и различных типов НСПРС

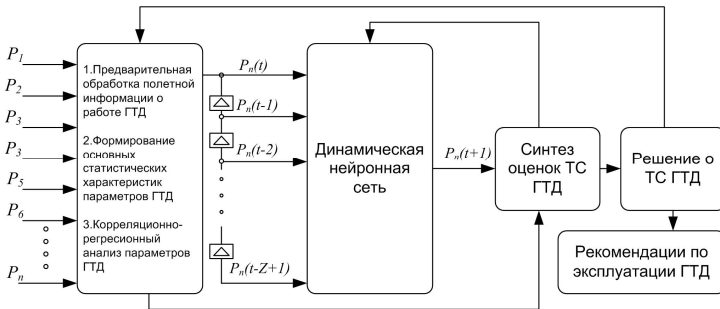


Рис.12. Общая схема подсистемы оценки ТС ГТД на основе математической статистики и ДНС

В третьем параграфе приведена методика комплексного диагностирования ТС ГТД, которая базируется на интеграции методов математической статистики, НСПРС, и результаты ее реализации.

Комплексная оценка ТС ГТД с помощью математической статистики и ДНС проводится на основе сравнительного анализа статистических границ (P_n^H , P_n^B) и нейропорогов (U_{II}^B и U_{II}^H). Эффективность разработанной стратегии диагностирования ТС ГТД определяется коэффициентами обнаружения диагностических ситуаций.

Анализ эффективности разработанной стратегии комплексного диагностирования ТС ГТД был рассмотрен на примере оценки состояния двигателя ПС-90А. Для начального этапа на основе полуэмпирической модели двигателя, а также данных реальных неисправностей был сформирован банк классов. Расчетные точки (20 точек) содержали информацию о семи имплантируемых классах. Далее с помощью СНС было произведено распознавание текущего состояния рассматриваемого двигателя ПС-90А, результаты которого приведены на рис.13. Анализ характера изменений коэффициентов $A(P_n)$ и $E(P_n)$ показывал, что интервалы наблюдений $N = 46 \div 54$, $N = 198 \div 202$ и $N = 248 \div 253$ для параметров $V_{КВД_3П}$, T_M и $n_{ВЕН}$

характеризуются аномальной работой системы смазки и суфлирования ГТД. Однако, согласно действующей методике анализа параметров, в рассматриваемый период эксплуатации двигатель ПС-90А был оценен как «исправный».

Согласно разработанной методике в период $N = 248 \div 253$ необходимо было провести определенный объем работы по контролю состояния двигателя. Несмотря на такое

обстоятельство, заводскими представителями ОАО «ПМЗ» (Россия) было принято решение о замене модуля задней опоры. После замены упруго-демпферной опоры в следующем полете была зафиксирована

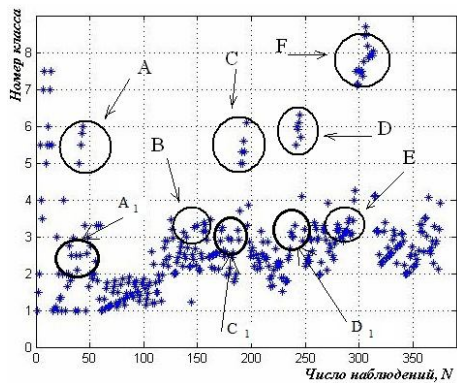


Рис.13. Распознавание текущего состояния двигателя ПС90А (с/н 3949853522035) на основе откликов СНС

предельная вибрация задней подвески ротора компрессора высокого давления $V_{КВД_ЗП}$.

Начиная с $N = 245$ (область D) полетная информация была подвергнута обработке с помощью ДНС с выходными параметрами $V_{КВД_ЗП}$, T_M и $n_{ВЕН}$, так как до точки $N = 245$ области D характерны $|A(V_{КВД_ЗП})|_{N=0+245} \rightarrow 0$, $|A(T_M)|_{N=0+245} \rightarrow 0$. В интервале $N = 308 \div 315$ для прогнозируемых значений $V_{КВД_ЗП}$ появляется признак $P_n^B(V_{КВД_ЗП}) < U_{П}^B(V_{КВД_ЗП}) < V_{КВД_ЗП}$, что указывает на строгое начало развития неисправности (рис.14). Причем, корреляционные связи между параметрами $V_{КВД_ЗП}$, $V_{В_ЗП}$ и $p_{ВЕН}$ также указывали на развитие неисправности двигателя в зоне вентилятора. Полученные выводы были подтверждены результатами эндоскопического обследования воздушного тракта двигателя (рис.15), где были обнаружены забоины и искривления нескольких рабочих лопаток компрессора низкого давления и вмятины лопаток вентилятора.

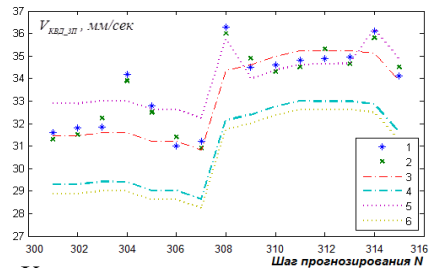
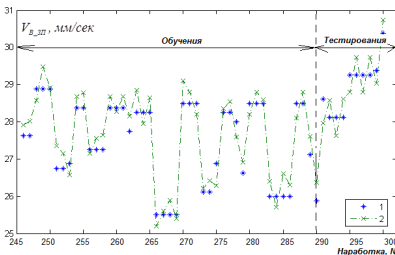
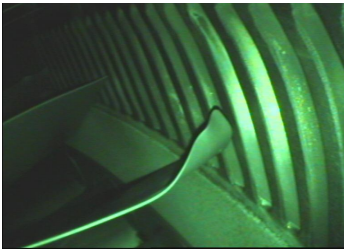
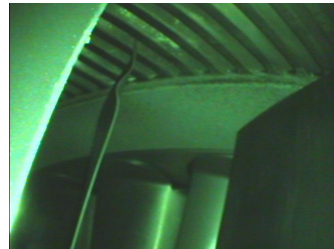


Рис.14. Прогнозирование параметров $V_{КВД_ЗП}$ двигателя ПС-90А (с/н 3949853522035)

$V_{КВД_ЗП}$ двигателя ПС-90А (с/н



а)



б)

Рис.15.Фрагмент эндоскопического обследования компрессора низкого давления двигателя ПС90А (с/н 3949853522035) (а-лопатка компрессора НД № 23, б-лопатка компрессора НД № 31)

Приведенная методика нашла свою состоятельность в результатах диагностирования для различных типов двигателей, где были обнаружены различные ситуации.

В четвертом параграфе приведена ассоциативно-интегрированная система диагностирования ТС ГТД, которая базируется на различные методы математической статистики, искусственного интеллекта и нечеткие термогазодинамические модели (рис.16).

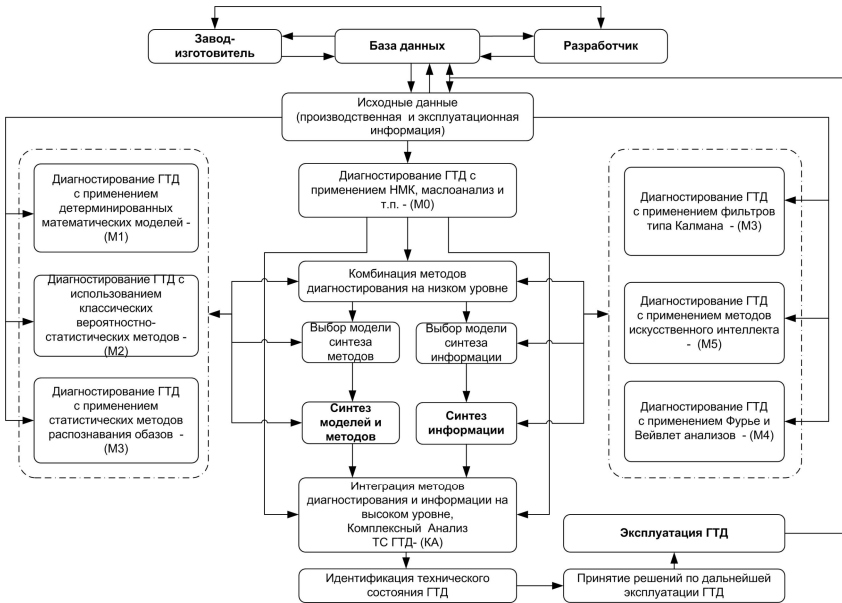


Рис.16. Архитектура ассоциативно-интегрированной системы диагностирования ТС ГТД

Рассмотрена математическая модель вибросостояния (и температурного состояния) ГТД, которая описывается нечеткими регрессионными уравнениями

$$\tilde{Y}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \otimes \tilde{x}_j; i = \overline{1, m}, \tilde{Y}_i = \sum_{r,s} \tilde{a}_{rs} \otimes \tilde{x}_1^r \otimes \tilde{x}_2^s; r = \overline{0, l}; s = \overline{0, l}; r+s \leq l, \text{ где } \tilde{a}_{ij} \text{ и } \tilde{a}_{rs} -$$

искомые нечеткие параметры.

Поставлена и решена задача определения нечетких значений параметров \tilde{a}_{ij} и \tilde{a}_{rs} приведенных уравнений на основе статистических нечетких данных параметров рабочего процесса ГТД,

т.е. на основе входных \tilde{x}_j и \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 и выходных \tilde{Y} (например, $V_{ПО}, V_{ЗО}, T_4^*$) координат модели.

Проведены исследования по диагностированию ГТД с помощью нечеткого анализа статистических характеристик параметров двигателя, которые позволяют сформировать дополнительные признаки по диагностированию двигателей. Поставлена и решена задача оценки ТС ГТД с использованием регрессионного анализа и фильтра типа Калмана с учетом погрешностей входных параметров.

Рассмотрена оценка ТС ГТД с помощью нечеткого анализа термогазодинамических параметров. Показано, что при диагностировании двигателей формулы приведения к САУ должны быть применены с учетом нечеткого характера термодинамических параметров ГТД:

$$\tilde{G}_{T,np} = \tilde{G}_T \frac{P_{H,CAV}}{\tilde{P}_H^*} \sqrt{\frac{T_{H,CAV}}{\tilde{T}_H^*}}, \quad \tilde{n}_{np} = \tilde{n} \sqrt{\frac{T_{H,CAV}}{\tilde{T}_H^*}}, \quad \tilde{T}_{4,np}^* = \tilde{T}_4^* \frac{T_{H,CAV}}{\tilde{T}_H^*},$$

где $\tilde{P}_H^*, \tilde{T}_H^*, \tilde{n}_{ВД}, \tilde{n}_{ВД}^*, \tilde{T}_4^*$ и \tilde{G}_T нечеткие значения измеренных параметров на рассматриваемом режиме полета. Нахождение значений \tilde{n}, \tilde{T}_4^* и \tilde{G}_T требует соответствующей оценки вершин функций принадлежности $d_n = 1, d_{T_4^*} = 1, d_{G_T} = 1$, где $d_n = \max_{n \in \{n\}} \mu_n(n)$,

$$d_{T_4^*} = \max_{T_4^* \in \{T_4^*\}} \mu_{T_4^*}(T_4^*), \quad d_{G_T} = \max_{G_T \in \{G_T\}} \mu_{G_T}(G_T).$$

подходами были рассмотрены регрессионные уравнения для вибрационного и температурного состояния двигателя Д-30КУ, статистические характеристики параметров, а также их границы с применением нечеткого анализа. В целях построения ассоциативной структуры системы комплексного диагностирования ГТД была показана эффективность предлагаемых подходов. Исследования показывают, что эффективность гибридных систем увеличивается при ассоциативной обработке исходной информации и результатов, полученных другими методами.

В заключении диссертационной работы отражены наиболее важные результаты, а также сформулированы основные выводы, следующие из представленных исследований и полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Поставлены и решены проблемы разработки методологических основ интеллектуализации комплексных систем диагностирования ГТД, базирующиеся на методах классической и современной математической статистики и технологии искусственного интеллекта и обеспечивающие повышение эффективности процессов управления эксплуатацией ГТД по техническому состоянию.
2. Предложена стратегия интеллектуальной оценки ТС ГТД с использованием комплекса индивидуальных методов диагностирования на основе имеющейся информации, что позволило выделить основные задачи диагностирования и их информационное сопровождение в системе оценки и управления ТС ГТД.
3. Разработан метод интеграции моделей диагностирования ГТД с использованием статистического распознавания, обучения и технологий искусственного интеллекта анализа полетной информации, эксплуатационных данных и знаний о техническом состоянии двигателя, который обеспечивает повышение уровня автоматизации, оперативности и достоверности оценки ТС ГТД.
4. Предложены модели принятия решений по управлению ТС ГТД на основе обработки и синтеза информации с применением Байесовского подхода, нечетких сетей доверия и теории свидетельств Демпстера-Шефера.
5. Разработан подход по синтезу моделей оценки и классификации ТС ГТД на основе имеющейся информации с использованием современной математической статистики и искусственного интеллекта.
6. Предложена система комбинирования классификаторов и классов ТС ГТД с применением технологий обучения и голосования на основе полетной и эксплуатационной информации, которая позволяет сформировать многоуровневую структуру системы диагностирования и управления ТС ГТД.
7. Разработаны и исследованы гибридные методы комплексной интеллектуальной оценки ТС ГТД в условиях неопределенности с применением математической статистики, нейронных сетей, нечеткой логики и термогазодинамической модели двигателя.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абдуллаев П.Ш. Диагностирование и локализация неисправностей авиационных газотурбинных двигателей на основе нечеткой логики, *Elmi məsələlər. Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan, 2009, Cild 11, № 4, s.3-15.*
2. Абдуллаев П.Ш. Математические модели диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, *Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi əsərləri, 2010, № 1, s.211-226.*
3. Абдуллаев П.Ш. Оценка технического состояния ГТД по данным полетной информации / Тезисы науч. конф. аспирантов и молодых исследователей посвящ. 80-летию Бакинского Гос. Университета им. М.А. Расулзаде, Баку, февраль, 2000, с. 8-9.
4. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д., Абдуллаев Э.А., Тахири Т.В. Идентификация технического состояния АГТД методами математической статистики и нейронных сетей, *Авиационно-космическая техника и технология, ХАИ, № 1 (78), 2011, с.72-86.*
5. Абдуллаев П.Ш., Автоматизация процесса оперативной оценки технического состояния двигателя Д-30КУ-154 по измеряемым в полете параметрам, *МАН-ın Elmi Məcmuələri, 2000-ci il., Cild 2, N2, s.32-35.*
6. Абдуллаев П.Ш., Информационное обеспечение автоматизированной системы “Оперативное диагностирование Д-30КУ-154”, *МАН-ın Elmi Məcmuələri, 2000-ci il., Cild 2, N1, s.16-18.*
7. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, 6-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2007», Москва. Тезисы докладов. – М: Изд-во МАИ, 1-4 октября 2007 с. 22.
8. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Порядок интеграции методов математической статистики в задачах формирования архитектуры динамической нейронной сети, Вычислительный интеллект (результаты, проблемы, перспективы), Материалы первой международной научно-технической конференции (10-13 марта 2011, г.Черкасы) – Черкасы: Маклаут, 2011, с 77-81.
9. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, *Научно-Технический Журнал Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, изд-во “ХАИ”, 2009, №5/62, стр.64-74.*
10. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д., Якушенко А.С. LVQ-сеть для распознавания технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, *ВІСНИК Національного Авіаційного Університету, 2007, № 1(31), стр.130-133.*
11. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Диагностирование авиационных газотурбинных двигателей с использованием нейронных сетей, *Ученые записки Национальной Академии Авиации, Баку, Azerbaijan, 2006, Том 8, № 3, стр.3-6.*
12. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Прогнозирование технического состояния авиационных газотурбинных двигателей с использованием нейронных сетей, *Transactions of Azerbaijan National Academy of Sciences, Informatics and Control Problems, Volume XXVI, №3, 2006, p.152-157, Известия Национальной Академии Наук Азербайджана, 2006, №3, с 152-157.*
13. Абдуллаев П.Ш., Оценка параметров состояния ГТД с учетом их законов распределения, *МАН-ın Elmi Məcmuələri, 1999-cu il., Cild 1, N1, s.31-33.*
14. Абдуллаев П.Ш., Оценка технического состояния ГТД по данным полетной информации, *М.Ə.Rəsulzadə adına Bakı Dövlət Universitetininin 80 illik yubileyinə həsr*

olunmuş Aspirantların və Gənc tədqiqatçıların Elmi Konfransının (fevral, 2000-ci il, Bakı, Azərbaycan) Tezisləri, I hissə, Bakı, 2000-ci il, s.8-9.

15. Абдуллаев П.Ш., Якушенко А.С., Мирзоев А.Д., Методика диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, Международная научно-техническая конференция проблемы и перспективные развития авиации, наземного транспорта и энергетики “АНТЭ-2007” 11 – 12 декабря 2007 года. Материалы конференции. Том 2. Казань: Изд-во Казан. Гос. Тех.ун-та. 2007, с. 3-7 .

16. Абдуллаев П.Ш. Оценка технического состояния ГТД по скорости изменения коэффициента асимметрии выбранного закона распределения Матер.научно-прак. семинара “Перспективы развития авиационной техники”/НАА, Гос. Концерн “AZAL”, -Баку-октябрь, 1997 г., стр.13-16.

17. Алиев А.Б., Абдуллаев П.Ш. Теория авиационных газотурбинных двигателей, Москва, Плюс, 1996., 316 с.

18. Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Использование временно-масштабного преобразования для распознавания информации, Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, 2-ci buraxılış, Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, 2002-ci il, s.59-62.

19. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Хуршудов Ш.А. Система диагностирования технического состояния авиационных ГТД, Milli Elmlər Akademiyasının akademiki Arif Mir Cəlal oğlu Paşayevin anadan olmasının 70-illiyinə həsr olunmuş "Mülki Aviasiyanın Müasir Problemləri" Respublika Elmi-Texniki Konfransın Əsərləri (3-4 fevral, 2004-cü il, Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan), Bakı-2004-ci il, s.83-85.

20. Пашаев А.М. , Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Система комплексной идентификации технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, Тезисы Докладов 3-й Международной Конференции “Авиация и Космонавтика-2004” (1-4 ноября 2004 г., МАИ, Москва, Россия), Москва, 2004, стр.36-37.

21. Пашаев А.М., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Оперативная оценка технического состояния ГТД по данным полетной информации, Научные труды НАА., Вып.1., Баку, Азербайджан, 1999 г., стр.120-133.

22. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Хуршудов Ш.А. Система диагностирования технического состояния авиационных ГТД, Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri. № 1, Bakı, Azərbaycan, 2004, s.68-83.

23. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Оценка технического состояния ГТД по полетной информации, Тезисы докладов XI Всероссийской Межвузовской Научно-Технической Конференции “Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели” посвященной 170-летию МГТУ имени Н.Э.Баумана (МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия, 15-17 ноября, 2000 г.), Москва, 2000 г., стр.22-24.

24. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Комплексная методика идентификации технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, “Контроль. Диагностика”, Журнал Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Москва, Россия, 2005, № 5, стр.16-22.

25. Пашаев А.М., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж., Меликов Э.Т. Порядок интеграции методов математической статистики и нейронных сетей в задачах

диагностирования ТС ГТД // Авиационно-космическая техника и технология, ХАИ, № 10 (97), 2012, с.170-176.

26. Пашаев А.М., Абдуллаев П.Ш., Якущенко А.С., Мирзоев А.Д. Нейросетевое распознавание технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, Transactions of Azerbaijan National Academy of Sciences, Informatics and Control Problems, Volume XXVIII, №3, 2008, p.3-7, Известия Национальной Академии Наук Азербайджана, 2008, №3, с 3-7.

27. Пашаев А.М., Аскеров Д. Д., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Система диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, Сборник Тезисов Докладов XII Всероссийской Межвузовской Научно-Технической Конференции “Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели” посвященной 175-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана и 55-летию кафедры Э-3 (24-26 ноября 2004, Москва, Россия), 2004, стр.209-211.

28. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А. Система нечетко-нейронной идентификации технического состояния авиационных ГТД, Тезисы Докладов II Международной Научно-Технической Конференции “Авиадвигатели XXI века”, Москва, Центральный Институт Авиационного Моторостроения им. П.И. Баранова, 6-9 декабря 2005 г., стр.253-256.

29. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Нечетко-нейронная идентификация технического состояния авиационных ГТД, Наукові праці: Науково-методичний журнал. Т.43., Вип.30., Техногенна безпека.-Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П.Могили, 2005, стр.16-25, Рекомендовано Программным Комитетом X Международного Конгресса Двигателестроителей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “Харковский авиационный институт”, Национальный Технический Университет “ХПИ”, ГП “Ивченко-Прогресс”, ОАО “АВТРАМАТ”, секция: САУ и диагностика (13-18 сентября 2005г., Харьков-Рыбачье, Украина)

30. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Система диагностирования технического состояния авиационных ГТД с применением нечетко-нейронного подхода, Научно-Технический Журнал Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, изд-во “ХАИ”, 2005, №3/19, стр.33-42, Рекомендовано Программным Комитетом Международной Научно-Технической Конференции “Авиационно-техническая техника и технология” посвященной 75-летию Национального Аэрокосмического Университета им. Н.Е. Жуковского “Харковский авиационный институт” (25-27 мая 2005г., Харьков, Украина).

31. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Егоров И.В., Абдуллаев П.Ш. Комплексная система оценки технического состояния авиационных ГТД, Научно-технический конгресс по двигателестроению, 9-й Международный Салон «Двигатели-2006», 11-15 апреля 2006 г., Москва, Россия

32. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыгов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Система комплексной идентификации технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана, серия «Машиностроение», 2006. № 2 (63), стр.99-112.

33. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Эффективность диагностирования ГТД с учетом законов распределения параметров в эксплуатации, Матер. VI Международной НТК “Машиностроение и техносфера на рубеже 21 века” (13-18 сентябрь, 1999 г., г.Севастополь, Украина), сборник научных трудов, Том 2,

Донецк, Украина, 1999 г., стр.234-237.

34. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Метод нечетко-нейронной идентификации технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, Научный Вестник МГТУ ГА, Серия: Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов., № 85, стр.93-100.

35. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Идентификация технического состояния авиационного ГТД с применением методов Soft Computing, Тезисы докладов XIII Всероссийской Межвузовской Научно-Технической Конференции “Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели”, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия, 29-31 октября, 2008 г., Москва, 2008 г., стр.154-155

36. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей, “Azərbaycan Hava Yolları” Dövlət Konserni, Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, 2004-cü il, 188 s.

37. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Комплексная методика диагностирования технического состояния ГТД, Milli Aviasiya Akademiyasının 10-illiyinə həsr olunmuş “Mülki Aviasiyanın müasir problemlərinin həllində Elm və Tədrisin rolu” Respublika Konfransının əsərləri (29-30 oktyabr, 2002-ci il, Azərbaycan, Bakı), Milli Aviasiya Akademiyası, 2002-ci il, s.22-26.

38. Пашаев А.М., Шахтахинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Система диагностирования авиационного ГТД с применением методов Soft Computing, Научно-Технический Журнал Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, изд-во “ХАИ”, 2009, №9/66, стр.194-197.

39. Пашаев А.М., Шахтахинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Комбинированный алгоритм обучения НС с прямым распространением сигнала в задачах диагностирования ТС АГТД / Международная научно-техническая конференция проблемы и перспективные развития авиации, наземного транспорта и энергетики “АНТЭ-2009”, Том 2. Казань: Изд-во Казан. Гос. Тех.ун-та, 2009, Т. 1, с. 343-346.

40. Пашаев А.М., Шахтахинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Система диагностирования авиационного ГТД с применением методов Soft Computing / Матеріалы 9 міжнародної науково – технічної конференції “АВИА - 2009”. Т.2 – К.: НАУ, 2009, с. 15.43-15.45.

41. Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш. Применение регрессионного анализа для оценки технического состояния авиационных ГТД, МАА-nın Elmi Məcmuələri, 1999-cu il., Cild 1, N1, s.11-16.

42. Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Агамалыева Дж.А. Вейвлет-анализ в задачах распознавания информации (сигналов). Milli Aviasiya Akademiyasının 10-illiyinə həsr olunmuş “Mülki Aviasiyanın müasir problemlərinin həllində Elm və Tədrisin rolu” respublika konfransının əsərləri, 29-30 oktyabr, 2002-ci il, Azərbaycan, Bakı, Milli Aviasiya Akademiyası, 2002-ci il, s.32-35.

43. Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Оценка технического состояния авиационного газотурбинного двигателя с применением методов Soft Computing, Научно-Технический Журнал Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, изд-во “ХАИ”, 2008, № 9(56), стр.201-205, Рекомендовано Программным Комитетом Международного Конгресса “XIII Международного Конгресса двигателестроителей” (14-19 сентября 2008г., Харьков, Рыбачье Украина).

44. Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Оценка вибрационного состояния

авиационных ГТД по динамике коэффициентов регрессии , Научные труды НАА., Вып. 1., г.Баку, Азербайджан, 1999 г.,стр.322-330.

45. Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш. Проблемы оценки технического состояния авиационных ГТД в эксплуатации, Материалы 5 Междун. Научно-Технического Симпозиума “Авиационные технологии 21 века” (в рамках “МАКС-99”, 17-22 август, 1999г.). Сборник трудов, Секц. 4 “Перспективные технологии летных испытаний и проблемы повышения безопасности полетов”, г. Жуковский, Россия, 1999 г.

46. Садыхов Р.А., Макаров Н.В., Абдуллаев П.Ш., Проблемы оценки технического состояния авиационных ГТД в эксплуатации Материалы 5 Междун. Научно-Технического Симпозиума “Авиационные технологии 21 века” (в рамках “МАКС-99”, 17-22 август, 1999г.). Аннотации докладов, секция 4, г. Жуковский, Россия, 1999 г., стр.29.

47. Шахтахтинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д., Якушенко А.С. Выбор оптимальной архитектуры нейронной сети для диагностирования авиационных газотурбинных двигателей, Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi əsərləri, 2006, № 2, s.61-72.

48. Шахтахтинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Нейронная идентификация технического состояния авиационных газотурбинных двигателей. Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi əsərləri, №2, 2005, səh.12-21.

49. Шахтахтинский М.Г., Кучер А.Г., Абдуллаев П.Ш., Якушенко А.С., Мирзоев А.Д. Данные для обучения нейронной сети распознаванию ТС ГТД, Труды Юбилейной Международной Научно-Технической Конференции посвященный 15-летию Национальной Академии Авиации, 2007, с. 122-125.

50. Abdullayev P., Methodology of Complex Diagnosing System for Aviation GTE, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, CT, July 21-23, 2008, Paper AIAA-2008-5136, 13 p.

51. Abdullayev P.S. Fuzzy Statistics approach for aviation GTE condition estimation technique, ASME 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA2006) July 4–7, 2006 , Torino, Italy, Volume 1: Advanced Energy Systems, Advanced Materials, Aerospace, Automation and Robotics, Noise Control and Acoustics, and Systems Engineering, Paper ESDA2006-95791, ISBN: 0-7918-4248-7, 2006, 9 p, pp.265-273.

52. Abdullayev P.S. Fuzzy Thermodynamic Models for Aviation GTE Condition Monitoring System, 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), Wichita, Kansas, Sep. 25-27, 2006, Paper AIAA-2006-7822.

53. Abdullayev P.S. Identification System of Aircraft Gas Turbine Engines' Technical Condition, AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), 16th Lighter-Than-Air Systems Technology Conference and Balloon Systems Conference, Arlington, Virginia, Sep. 26-28, 2005, Session: 32-ATIO-22 Progress in Aircraft Maintenance Technology and Operations, Conference Paper AIAA-2005-7419, 2005, 14 p.

54. Abdullayev P.S. Identification System of Aviation Gas Turbine Engines' Technical Condition , 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cincinnati, OH, July 8-11, 2007, Paper AIAA-2007-5111.

55. Abdullayev P.S. Methodology of Complex Diagnosing System for Aviation GTE, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition, 21 - 23 Jul 2008,

- Connecticut Convention Center, Hartford, CT, Abstract of paper AIAA-2008-5136, 1 p.
56. Abdullayev P.S., Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Mirzoyev A.J. Fuzzy Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engines ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2007) November 11–15, 2007, Seattle, Washington, USA, Sponsor: ASME, Volume 1: Advances in Aerospace Technology, ISBN: 0-7918-4295-9, 2007, Paper no. IMECE2007-43902 pp. 41-54 (14 pages).
57. Abdullayev P.S., Pashayev M.J., Sadiqov R.A., Mirzoyev A.J. Structure of a Complex Diagnosis System for Aviation Engines, ISABE 2011, 20th Conference, Sustainable and Competitive Aero Engine Research and Technology, September 12-16, 2011, Gothenburg, Sweden, 13 p.
58. Abdullayev P.S., Yakushenko A.S., Mirzoyev A.J. The complex approach to the decision forming of aviation gas turbine engine technical condition, Proceedings of the third world Congress “Aviation in The XXI century” “Safety in Aviation and Space Technology”, 22-24 september 2008, Volume 1, Kyiv 2008, Ukraine, p.13.5-13.6.
59. Pashayev A. M., Askerov D.D., Ardil C., Sadiqov R. A., Abdullayev P. S. Complex Condition Monitoring System of Aircraft Gas Turbine Engine, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 3(1), 2006, p.1-7, issn 1307-4318.
60. Pashayev A.M., Ardil C., Askerov D. D., Sadiqov R. A., Abdullayev P. S. Aircraft Gas Turbine Engines' Technical Condition Identification System. International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences, 2(4), 2005, p.209-214, issn 1307-6906.
61. Pashayev A.M., Askerov D.D., Ardil C., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Identification of Aircraft Gas Turbine Engine's Temperature Condition, International Journal of Computer, Information, and Systems Science, and Engineering, 1(1), 2007, p.10-18, issn 1307-2331.
62. Pashayev A.M., Askerov D.D., Ardil C., Sadiqov R. A., Abdullayev P.S. Multistage Condition Monitoring System of Aircraft Gas Turbine Engine, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2(4), 2005, p.163-169, issn 1307-4318.
63. Pashayev A.M., Askerov D.D., Sadiqov R.A. Abdullayev P.S. Identification System of Aircraft Gas Turbine Engines' Technical Condition, Journal “Aviation”, Vilnius, VGTU, LIEDYKLA TECHNIKA, 2008, 12(4), crp.101-112.
64. Pashayev A.M., Askerov D.D., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Identification technique of aircraft gas turbine engine's health, 7th Biennial ASME Conference Engineering Systems Design and Analysis (19-22 July, 2004, Manchester, UK), Conference Paper ESDA2004-58168, 2004, pp.129-138.
65. Pashayev A.M., Askerov D.D., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Aircraft Gas Turbine Engines' Technical Condition Identification System, ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air (GT2005) June 6–9, 2005, Reno, Nevada, USA, Sponsor: International Gas Turbine Institute, Volume 1: Turbo Expo 2005, ISBN: 0-7918-4699-7, Paper no. GT2005-69072, pp. 221-230 (10 pages).
66. Pashayev A.M., Askerov D.D., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Fuzzy-neural Approach for Aircraft Gas Turbine Engines Diagnosing, AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, Illinois, 20-22 September, 2004, Conference Paper AIAA-2004-6222, 2004, 15 p.
67. Pashayev A.M., Sadiqov R., Abdullayev P.S., Sadiqov A.H., Mirzoyev A.J., Structure of Complex Diagnosing System for Propulsion Systems, 16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, AIAA 2009-7333, 2009, p. 1-14.

68. Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Complex identification technique of aircraft gas turbine engine's health, ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference (GT2003) , June 16–19, 2003 , Atlanta, Georgia, USA , Sponsor: International Gas Turbine Institute , Volume 1: Turbo Expo 2003 , ISBN: 0-7918-3684-3 , Paper GT2003-38704 pp. 179-187 (9 pages).
69. Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S. Neuro-Fuzzy Identification of Aircraft Gas Turbine Engine's Technical Condition. Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence -ICCI 2004 (27-29 May, 2004, Nicosia, North Cyprus), 2004, p.136-142.
70. Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S., Aircraft Gas Turbine Engine's Technical Condition Identification Technique, International Conference "RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION"-RelStat'03 (16-17 October, 2003, Riga, Latvia), Programme and Abstracts.- Riga: Transport and Telecommunication Institute, 2003, 87-88 pp.
71. Pashayev M.J., Sadiqov R.A.J. Abdullayev P.S., Sadiqov A.H., Miirzoyev A.J. Structure of a Complex Diagnosis System for Aviation Engines, International Symposium of Mechanism and Machine Science, AzC IFToMM 2010, October 5-8, 2010, Izmir Institute of Technology, Urfa, Izmir, Turkey
72. Pashayev M.J., Sadiqov R.A.J., Abdullayev P.S., Miirzoyev A.J. Application of Soft Computing Methods in Complex Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engines, International Symposium on Advances in Applied Mechanics and Modern Information Technology, 22-23 September 2011, Baku, Azerbaijan
73. Sadiqov R.A., Makarov N.V., Abdullayev P.A. Problems of estimation aviation gas turbine engines state in maintenance, V International Symposium an Aeronautical Sciences "New Aviation Technologies of the XXI century", Collection of technical papers, Section N4, ("MAKS-99", 17-22 august, 1999), Zhukovsky, Russia, August, 1999.
74. Shaxtaxtinskiy M.G., Abdullayev P.S., Mirzoyev A.J. Soft Computing Methods in Complex Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engine, Всероссийская конференция молодых ученых и студентов Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008. 21-24 апреля 2008 г. Москва. Тезисы докладов-М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008, стр.9-10.
75. Shaxtaxtinskiy M.G., Abdullayev P.S., Mirzoyev A.J., Yakushenko A.S., Oxmakecich V.N. Application of Soft Computing Methods in Complex Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engine, Материалы VIII Международной Научно-Технической Конференции "АВИА-2007", 2007, Т.2., стр. 31.14-31.17 , Материалы 8 міжнародної науково – технічної конференції "АВІА - 2007". Т.2 – К.: НАУ, 2007, с. 31.14-31.17.

PƏRVİZ ŞAHMURAD OĞLU ABDULLAYEV

**AVIASIYA QAZ TURBİN MÜHƏRRİKLƏRİNİN
DİAQNOZLAŞDIRMA SİSTEMLƏRİNİN
İNTELLEKTUALLAŞDIRILMASI**

Xülasə

Dissertasiyada müasir və perspektiv aviasiya qaz turbin mühərriklərinin (QTM) diaqnozlaşdırma sistemlərinin aktual problemlərinə baxılmışdır. Göstərilmişdir ki, mühərriklərin halının kompleks və etibarlı qiymətlərinin alınması QTM-nin vahid diaqnozlaşdırma sistemində müxtəlif metodların və modellərin düzgün inteqrasiyası və diaqnozlaşdırma proseslərinin intellektuallaşdırılması hesabına təmin olunur. Ehtimal-statistika metodlarına və süni intellekt texnologiyalarına əsaslanan QTM-nin texniki halının (TH) kompleks qiymətləndirmə sistemlərinin intellektuallaşdırılmasının metodoloji əsasları işlənmişdir.

Mühərrikin halının intellektual kompleks qiymətləndirilməsi üçün mövcud informasiyanı nəzərə alan fərdi metodların istifadə strategiyası təklif olunmuşdur. İşlənmiş strategiya özündə QTM TH-nın neyron modelinin arxitekturasının riyazi statistika metodların köməyi ilə empirik formalaşdırılmasını, qeyri-səlis məntiq tətbiqi ilə ştat ölçmələrinə əsaslanan QTM TH-nın qiymətləndirmə sisteminin qurulmasını, genetik alqoritmlərin köməyi ilə diaqnozlaşdırma proseslərinin optimallaşdırılmasını və QTM-nin müxtəlif növ siqnallarının emalında veyvlet analizinin istifadəsini özündə ehtiva edir.

Bayes yanaşması, qeyri-səlis inam şəbəkələri və Dempster-Şeferin şahidlər nəzəriyyəsi tətbiq edilməklə müxtəlif mənbələrdən və emal nəticələrindən alınan informasiyanın sintezinə əsaslanan QTM TH-nın qiymətləndirilməsi və idarə olunması üçün riyazi modellərə baxılmışdır. QTM TH-nın diaqnozlaşdırılma və idarə olunma sisteminin optimal miqdarda informasiya ilə təmin olunması üçün səsvermə, bilik-özünüaparma fəzası və Borda qiymətləndirmə metodları əsasında mühərriklərin halının siniflərinin sintez strategiyası təklif olunmuşdur. Burada QTM TH-nın çoxsəviyyəli diaqnozlaşdırılma və idarə olunma sisteminin strukturunun formalaşdırılması üçün mühərriklərin halının qiymətləndirmə və təsnifatlandırma metodlarının və modellərinin inteqrasiyası və sintezi obrazların statistik tanınması, maşın öyrədilmə metodları və süni intellekt texnologiyaları əsasında aparılır.

Qeyri-müəyyənlik şəraitində mühərriklərin halının diaqnozlaşdırılması və idarə olunması məsələlərinin həll keyfiyyətini yüksəltmək və mühərrikin halının idarə olunması sisteminin tərkibində istifadə tələblərini formalaşdırmaq məqsədi ilə mühərrikin termoqazodinamik modeli, riyazi statistika, statik və dinamik neyron şəbəkələri və qeyri-səlis məntiq tətbiq edilməklə QTM TH-nın intellektual qiymətləndirilməsi üçün hibrid metodların kompleks təklif edilmiş və işlənmişdir.

**INTELLECTUALIZATION OF DIAGNOSTIC SYSTEMS OF AIRCRAFT
GAS TURBINE ENGINES**

Summary

In the dissertation, an actual problem of intellectualization of diagnostic systems for modern and advanced aviation gas turbine engines (GTE) has been investigated. It is shown that obtaining comprehensive and reliable assessment of the engines is ensured by correct integration of various methods and models within a single diagnosing system of GTE and intellectualization of diagnosis processes. The methodological basics for intellectualization of complex systems of health assessment for GTE which based on probabilistic and statistical techniques and Artificial Intelligence Technologies have been developed.

The strategy for the use of individual methods for intelligent comprehensive assessment of the engine health, taking into account the available information has been proposed. The strategy consists in formation of the architecture of the empirical neural model of GTE health using statistical techniques; building an assessment system of the GTE health state using fuzzy logic which based on cockpit measurements; diagnostic processes optimization using genetic algorithms and the use of wavelet analysis in the treatment of various kinds of GTE signals.

Mathematical models for health assessment and decisions management for GTE maintenance based on the information fusion from various sources and information processing results using the Bayesian approach, fuzzy belief networks and Dempster-Shafer theory of evidences. A fusion strategy of state classes for engine based on the voting, Behavior-Knowledge Space and Borda count methods in order to provide a GTE health diagnosis and management system with optimal amount of information has been proposed. In this case, the integration and fusion of engines' state assessment and classification's methods and models is based on the statistical pattern recognition, machine learning methods and Artificial Intelligence Technologies, allowing the formation of a multi-level structure for a GTE health diagnosis and management system.

A set of hybrid methods for intelligent assessment of GTE, allowing increasing the quality of the solution of problems of engine diagnosis and management under uncertainty conditions are developed. These methods allows form requirements for their implementation in the GTE intellectual health management system using engine physic's models, mathematical statistics, static and dynamic neural networks and fuzzy logic.

Подписано к печати 02.06.2014 г.
Тираж 100 экз. Формат 60x84 1/16

***Отпечатано в центре полиграфии
Национальной Академии Авиации
«Азербайджан Хава Йоллары»***

**«AZƏRBAYCAN HAVA YOLLARI»
QAPALI SƏHMDAR CƏMİYYƏTİ
MİLLİ AVİASİYA AKADEMİYASI**

Əlyazma hüququnda

PƏRVİZ ŞAHMURAD OĞLU ABDULLAYEV

**AVİASİYA QAZ TURBİN MÜHƏRRİKLƏRİNİN
DİAQNOZLAŞDIRMA SİSTEMLƏRİNİN
İNTELLEKTUALLAŞDIRILMASI**

**3352.01 – «Hava nəqliyyatının istismarı» ixtisasından texnika üzrə
elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın**

AVTOREFERATI

BAKI - 2014