

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

На правах рукописи

АЗЕР ДЖАВАНШИР оглы МИРЗОЕВ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 3352.01 - "Эксплуатация воздушного транспорта"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по технике

БАКУ- 2013

Работа выполнена в Национальной Академии Авиации, Закрытое Акционерное Общество «Азербайджан Хава Йоллары»

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

д.ф-м., академик

М.Г. Шахтахтинский

к.т.н., доцент

П.Ш. Абдуллаев

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

д.т.н., профессор

Р.М. Джафарзаде

д.т.н., профессор

Р.М. Алыгулиев

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Институт Кибернетики Национальной Академии Наук Азербайджана, Лаборатории "Технологии идентификации" и "Информационные системы с инновационным ориентированием".

Защита состоится "___" _____ 2013 г. в ___ часов на заседании Специализированного совета D 06.001 Национальной Академии Авиации по адресу:
AZ1045, Баку, Бина, 25-й км, Национальная Академия Авиации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национальной Академии Авиации.

Автореферат разослан "___" _____ 2013 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
философии по технике, доцент**

С.Б. Габидуллаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы диагностирования авиационных газотурбинных двигателей. Высокие темпы развития гражданской авиации (ГА) и превращение ее в массовый вид транспорта придают особую актуальность проблемам повышения эффективности использования летательных аппаратов (ЛА), обеспечения высокой безопасности воздушных перевозок и сокращения эксплуатационных расходов. Успешное решение этих проблем тесно связано с необходимостью постоянного совершенствования программы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) авиационной техники (АТ), что возможно переходом ее к стратегии обслуживания по фактическому состоянию. При данной стратегии повышение эффективности применения АТ достигается за счет полного использования конструктивно-эксплуатационных возможностей каждого конкретного объекта (планера, функциональных систем, двигателя), а улучшение показателей безопасности, регулярности полетов – путем своевременного выявления и предупреждения предотказных и неисправных состояний воздушного судна (ВС).

Основным направлением формирования программы ТО и Р по фактическому состоянию является разработка и внедрение в практику эксплуатации эффективных методов мониторинга и диагностирования АТ.

Одним из изделий АТ, техническое состояние которого в значительной степени определяет уровень безопасности и регулярности полетов, является авиационный газотурбинный двигатель (АГТД). Авиационный газотурбинный двигатель, как восстанавливаемый динамический объект в течение срока службы, требует постоянного мониторинга и диагностирования, успешное решение которых позволяет повысить надежность процессов функционирования и эксплуатации и продлевает его жизненный цикл «на крыле». Особую остроту проблемы мониторинга и диагностирования приобретают с поступлением в эксплуатацию новых поколений АГТД, которые, помимо высоких энергетических и экономических показателей, отличаются высокой нагруженностью конструктивных элементов, повышенной чувствительностью к условиям эксплуатации и имеют высокую стоимость производства.

В настоящее время потенциалы разработанных и внедренных в практику эксплуатации систем мониторинга и диагностирования ТС АГТД сильно ограничены, в основном степенью универсальности и полнотой диагностирования для различных поколений двигателей. Обеспечение требуемого уровня универсальности и полноценности диагностирования представляется возможным путем внедрения комплексной системы, позволяющей производить мониторинг и обработку информации в полете с дальнейшим углубленным анализом на земле.

Основной проблемой создания комплексной системы диагностирования, позволяющей получить точную оценку ТС АГТД, является отсутствие эффективного подхода к интеграции различных методов диагностирования и принятия заключительного решения о дальнейшей эксплуатации двигателя.

Наряду с вышеотраженными проблемами, разработка эффективной системы диагностирования ТС АГТД, позволяющей развивать, обобщать и комбинировать в едином комплексе методов, качественно углубляющей процесс диагностирования двигателей на основе обработки полетной информации определяет актуальность данной работы.

Цель исследования:

Разработка научно-обоснованной методики диагностирования ТС АГТД, базирующейся на комплексной обработке значений параметров рабочего процесса двигателя с использованием методов математической статистики и нейронных сетей (НС).

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- анализ современного состояния методов параметрического диагностирования ТС АГТД и определение основных направлений их усовершенствования;
- экспериментальное исследование основных характеристик статических и динамических НС с целью разработки нейросетевой модели АГТД;
- экспериментальное исследование возможности применения статистических характеристик параметров рабочего процесса АГТД в формировании его нейромодели;

- исследование и разработка принципов формирования диагностических признаков ТС на основе доступных математических моделей АГТД;
- разработка методики формирования архитектуры динамической и статической нейросетевой модели АГТД в задачах диагностирования;
- разработка методики диагностирования ТС АГТД на основе интеграции методов математической статистики и нейронных сетей;
- разработка новой методики принятия решений о дальнейшей эксплуатации АГТД на базе нейро-статистической идентификации состояния двигателя;
- оценка эффективности разработанной методики диагностирования ТС АГТД.

Методы исследований базируются на теории технической диагностики, математического моделирования, математической статистики, нейронных сетей, теории планирования эксперимента, теории авиационных газотурбинных двигателей, теории и практики технической эксплуатации ВС.

Экспериментальной базой являлись:

- парк силовых установок воздушных судов, эксплуатирующихся в ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары» и ООО «Silk Way Airlines» (г. Баку, Азербайджан);
- средства регистрации полетной информации;
- статистические данные по отказам и неисправностям различных типов двигателей;

На защиту выносятся:

комплексная методика диагностирования ТС АГТД по параметрам, зарегистрированным различными средствами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан порядок применения статистических характеристик параметров рабочего процесса АГТД в формировании его нейро-модели;
- разработаны принципы формирования диагностических признаков состояния на основе доступных математических моделей АГТД;
- разработан новый подход к формированию архитектуры динамической и статической нейросетевой модели АГТД в задачах диагностирования;

- разработана методика диагностирования ТС АГТД на основе нейромодели двигателя при недостаточной эксплуатационной информации;
- разработана новая методика диагностирования ТС АГТД на основе интеграции методов математической статистики и нейронных сетей;
- разработана новая методика принятия решений о дальнейшей эксплуатации АГТД на базе нейро-статистической идентификации ТС двигателя.

Практическая ценность работы

Полученные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные результаты позволяют создать систему диагностирования ТС АГТД на основе комплексного подхода, способствующую повысить безопасность и регулярность полетов. Разработанная система диагностирования успешно реализована на различных образцах двигателей и рекомендована к применению в практике регулярной эксплуатации ВС.

Реализация результатов работы

Разработанная методика диагностирования ТС АГТД успешно прошла испытания в компании «Silk Way Airlines» (г. Баку, Азербайджан), в ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары» и рекомендована к технической эксплуатации самолетов Ил-76-90SW (двигатель ПС-90А), Gulfstream G550 (двигатель BR710-700), Boeing 757-200 (двигатель RB211-535E4) и 767-300ER (двигатель CF6-80C2).

Результаты исследований были рекомендованы к внедрению в учебный процесс Национальной Академии Авиации (Баку, Азербайджан), Национальным Авиационным Университетом (Киев, Украина) и Московским Государственным Техническим Университетом Гражданской Авиации (Москва, Российская Федерация) при подготовке инженеров-механиков в учебном курсе «Диагностика авиационной техники» и к использованию в рамках курсов повышения квалификации инженерно-технического состава, а также в работе аспирантов, специализирующихся в области создания автоматизированных систем диагностирования АГТД.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на международных научно-технических конференциях (НТК):

- Международная НТК “АВИА - 2007” (Национальный Авиационный Университет, Киев, Украина, 25-27 апреля 2007г.);

- 6-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2007», посвященная 50-летию запуска первого искусственного спутника Земли и 95-летию ММП «Салют» (Московский Авиационный Институт, Москва, Российская Федерация, 1 -4 октября 2007г.);
- Международная НТК «XV Туполевские чтения» (Казанский Государственный Технический Университет им. А.Н. Туполева, Казань, Республика Татарстан, Россия, 9 - 10 ноября 2007г.);
- Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Российская Федерация, 2007);
- Международная НТК по проблемам и перспективам развития авиации, наземного транспорта и энергетики “АНТЭ-2007” (Казанский Государственный Технический Университет им. А.Н. Туполева, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 11 – 12 декабря 2007г.);
- Proceedings of the third world congress «Aviation in the 21-st century», «Safety in Aviation and Space Technology» (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2008);
- Всероссийская НТК молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008» (Московский Авиационный Институт, Москва, Российская Федерация, 2008);
- XIII Всероссийская межвузовская НТК «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, 2008);
- Международная НТК «Проблемы и перспективные развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2009”(Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 12-13 октября 2009г.); Международная НТК “АВИА - 2009” (Национальный Авиационный Университет, Киев, Украина, 21-23 сентября 2009г.);
- Матеріали 9 міжнародної науково – технічної конференції “АВІА - 2009” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2009);
- Материалы Первой Международной Научно-Технической конференции Вычислительный интеллект (Черкассы, Маклаут, Украина, 10-13 марта 2011).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 29 печатных трудах.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и приложений. Содержит

110 страниц машинописного текста, в том числе 53 рисунка, 24 таблицы и список цитируемой литературы в количестве 183 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цели и основные задачи, научная новизна и практическая ценность результатов проведенных исследований.

В первой главе рассмотрены перспективные направления создания эффективных систем диагностирования ТС АГТД на основе обработки полетной информации и их внедрения в практику текущей эксплуатации.

В первом параграфе рассмотрены перспективы развития автоматизированных систем диагностирования (АСД) ТС двигателей, которые, в зависимости от способа получения и обработки информации, условно подразделяются на наземные и бортовые.

Анализ недостатков и преимуществ наземных и бортовых АСД подчеркивает все большую потребность в создании комплексных наземно-бортовых АСД, степень эффективности которых во многом определяется возможностями средств регистрации, обработки и хранения параметров.

Во втором параграфе обоснована целесообразность применения диагностической информации, зарегистрированной как в полете, так и на земле либо вручную, в карты регистрации значений параметров и наработки двигателей, либо автоматизировано с помощью специальных машинных средств. Здесь автором приведены результаты сравнительного анализа возможностей различных средств регистрации, которые подчеркивают важную роль комбинаций средств с целью повышения эффективности методов диагностирования ТС АГТД.

В третьем параграфе на основе обзора исследований в области создания систем диагностирования ТС АГТД проанализированы различные методы оценки и установлены их преимущества и недостатки. Анализ исследований в области диагностирования ТС двигателей, реализующих параметрические методы, позволяет провести следующее подразделение методов оценки:

- вероятностно-статистические методы;
- детерминированные методы;
- современные методы интеллектуального анализа данных;
- комбинированные методы.

Обзор литературных источников, описывающих применение вышеизложенных методов и подходов оценки ТС АГТД, показывает, что для полного выявления и локализации всех неисправностей и отказов, возникающих в двигателе в процессе эксплуатации, эти методы и подходы должны применяться, по возможности, в совокупности. Такой стратегии диагностирования, учитывая анализ проведенных исследований для двигателей с различными уровнями контролепригодности в условиях эксплуатации, автор дал предпочтение математической модели двигателя, методам математической статистики и НС.

Во второй главе с целью реализаций вышеупомянутой стратегии диагностирования проведены углублённые экспериментальные исследования характеристик различных типов НС на основе обработки полетных информации двигателей и статистических характеристик параметров рабочего процесса АГТД.

В первом параграфе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик различных статических НС с целью применения их в задачах диагностирования АГТД. Исследования показали, что в качестве базовой сети целесообразно применить НС с прямым распространением сигнала (СНС). Экспериментальным путем подтверждены разработанные основные подходы формирования их архитектуры:

- определение формы гиперболической тангенсальной функции активации в нейронах;
- разработка эффективного алгоритма и метода обучения;
- оценка адекватности разработанной нейросетевой модели АГТД;
- определение необходимого количества нейронов в скрытом слое.

1. В качестве базовой функции активации была выбрана нелинейная функция гиперболического тангенса и получены нижеприведенные эмпирические формулы для определения коэффициента крутизны данной функции:

а) скрытый слой

$$\alpha_{ск} = -1373,98 + 27,108 \cdot K_{ОШ}^O + 11,007 \cdot U_{вх} - 0,134 \cdot K_{ОШ}^{O^2} - 0,102 \cdot U_{вх} \cdot K_{ОШ}^O - 0,044 \cdot U_{вх}^2$$

б) выходной слой

$$\alpha_{вых} = 98,216 - 1,24 \cdot K_{ОШ}^O - 68,609 \cdot U_{вых} + 0,003 \cdot (K_{ОШ}^O)^2 + 0,708 \cdot K_{ОШ}^O \cdot U_{вых} - 0,726 \cdot U_{вых}$$

где α - коэффициент крутизны соответствующей активационной функции, $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ - размерность входного и выходного пространств СНС, $K_{ОШ}^O$ - коэффициент ошибки распознавания расчетных точек учебного и тестового набора данных соответственно.

2. В качестве базового алгоритма обучения разработан комбинированный алгоритм на базе алгоритма Полака-Рибьера и Левенберга-Марквардта, настройка параметров обучения которого выполняется следующим образом:

$$X_{k+1} = \begin{cases} X_k - (H + \mu I)^{-1} g_k^{LM}, & \text{если } J < J_\phi \\ X_k + \eta_k p_k, & \text{если } J > J_\phi \end{cases}$$

где X_k - параметры обучения комбинированного алгоритма на k -ой итерации (цикла) обучения, J_ϕ - функционал ошибки обучения, при котором значение весов и смещение сети фиксируются и присваиваются начальным значениям параметров алгоритма Полака-Рибьера ($J_\phi = 0.1118$).

3. Степень адекватности разработанной нейросетевой модели АГТД автор предлагает выполнить на основе следующего соотношения:

$$K_{ОШ} = \frac{N_{Н.Р.}}{N_{ОБЩ}} \cdot 100\%$$

где $K_{ОШ}$ - коэффициент ошибки распознавания расчетных точек классов ТС АГТД, $N_{Н.Р.}$ и $N_{ОБЩ}$ - количество неправильно распознанных и общих расчетных точек классов двигателя соответственно.

4. Критерияльным условием определения необходимого количества нейронов в скрытом слое автор предложил момент возникновения эффекта «переобучения»:

$$(K_k^{K(T)} - K_k^Y) - (K_{k-1}^{K(T)} - K_{k-1}^Y) > 0$$

где $K_{ош}^{K(T)}$ и $K_{ош}^Y$ - коэффициенты ошибки распознавания контрольных (тестовых) и учебных данных, k - номер эпохи (цикла) обучения.

Во втором параграфе приводится схема получения диагностических признаков (расчетных точек) имитированных классов ТС на основе сформированных математических моделей (ММ) АГТД: эмпирических, полуэмпирических и термогазодинамических моделей двигателя.

В третьем параграфе приведены результаты исследований рекуррентных (динамических) НС, которые широко применяются в задачах прогнозирования ТС АГТД.

Результаты экспериментальных исследований показали, что одной из эффективных рекуррентных НС является сеть Time Delay Neural Network (TDNN), основные этапы формирования которой идентичны СНС, за исключением:

- оценки адекватности нейросетевой модели АГТД;
- формирования входного и выходного пространств нейросетевой модели АГТД.

Оценку адекватности сети TDNN предлагается выполнить на основе разработанных коэффициентов ошибки аппроксимации K_{k1} и K_{k2} :

$$K_{k1} = |(P_{НС} - P_{Ж}) / P_{Ж}| \cdot 100\%$$

где $P_{НС}$ и $P_{Ж}$ - фактический и желаемый выходы динамической сети соответственно.

$$K_{k2} = (1 - S) \cdot 100\%$$

где S - среднеквадратическое отклонение выхода сети.

В четвертом параграфе приведены результаты исследований различных диагностических ситуаций двигателей в эксплуатации на основе основных характеристик законов распределения и корреляционных связей. Анализ исследований показал, что эти факторы обладают повышенной степенью чувствительности к началу развития неисправности АГТД, что и позволило автору применить их в качестве признаков формирования входного и выходного пространств динамической нейросетевой модели АГТД.

Третья глава посвящена непосредственно разработке методики диагностирования ТС АГТД.

На основе изложенных во второй главе исследований, разработана комплексная методика диагностирования ТС АГТД, общая характеристика которой приведена **в первом параграфе**. Разработана и предлагается обобщенная двухэтапная методика оценки ТС АГТД, которая приведена на рис.1.

На первом этапе проводится сравнительный анализ значений параметров двигателя с значениями параметров из банка классов ТС,

внедренных в структуру СНС и ставится первичный диагноз. По степени изменения разницы сравниваемых значений параметров оценивается интенсивность развития дефекта.

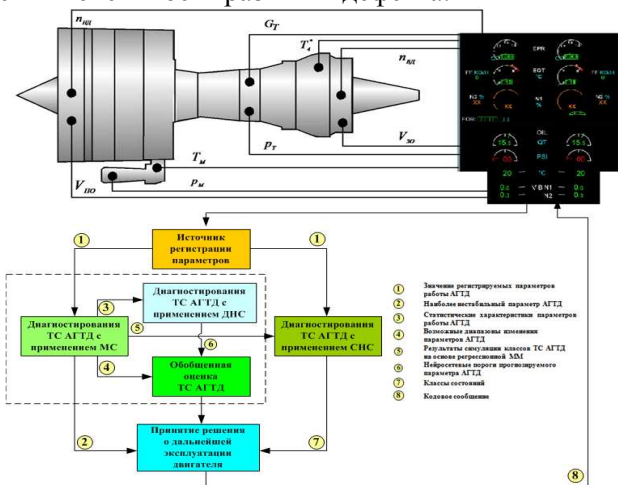


Рис. 1 Обобщенная схема методики диагностирования ТС АГТД

Здесь также с начала эксплуатации подсчитываются основные статистические характеристики параметров, характеризующих работу двигателя (коэффициенты асимметрии, эксцесса и корреляции) и анализируется их динамика изменения по мере наработки АГТД. Эти характеристики используются как в качестве признаков индивидуальной оценки ТС двигателя так и в качестве признаков для формирования архитектуры TDNN.

В случае если первичный диагноз содержит сообщение о возможности неисправности, выполняется уточнение и прогнозирование ТС двигателя (второй этап). Здесь рассчитываются два гибких диапазона - нейросетевой порог и статистический возможный диапазон соответствующих параметров двигателя, различные комбинации которых позволяют идентифицировать состояние двигателя на несколько полетов вперед.

Во втором параграфе приведен порядок реализации модуля разработанной интегрированной методики диагностирования ТС двигателя на основе статической нейромодели АГТД. Здесь разработаны основные этапы формирования архитектуры

предложенной СНС и банка имитированных и реальных классов АГТД.

В третьем параграфе приведен порядок реализации модуля разработанной интегрированной методики диагностирования ТС двигателя на основе математической статистики и динамической нейромодели АГТД. Также приведены основные этапы формирования архитектуры предложенной TDNN.

В четвертом параграфе приведены возможные диагностические ситуации, сформированные на основе различных комбинаций нейростатистической идентификации ТС двигателя.

Порядок оценки эффективности разработанной методики диагностирования ТС АГТД, как в целом, так и его модулей выполняется на основе условий разработанных автором **в пятом параграфе**.

Шестой параграф посвящен алгоритмической реализации разработанной методики диагностирования ТС АГТД, наличие которой позволяет создать гибкую АСД.

В четвертой главе проведен сравнительный анализ результатов идентификации, полученных с применением разработанной методики и результатов диагностирования, полученных с использованием параметрических и физических методов, применяемых в подразделениях гражданской авиации.

В первом параграфе приведены результаты исследований по изучению ТС двигателя CF6-80C2 (с/н 707215), который с начала эксплуатации работал с завышенным значением вибрации вала турбины низкого давления. Полетные данные двигателя обрабатывались только на основе диагностирования статической нейромодели двигателя CF6-80C2. Здесь на основе регрессионной модели двигателя CF6-80C2 сформирован банк классов, содержащий 8 имплантированных классов и 1 реальную неисправность.

Результаты распознавания текущего состояния двигателя CF6-80C2 приведены на рис. 2, где по оси абсцисс показана наработка двигателя, а по оси ординат – номера имитированных и реальных классов ТС двигателя. Согласно результатам распознавания ТС двигателя начиная с 16 августа 2012, наблюдается однозначная тенденция развития неисправности по каналам вентилятора (класс 2) и турбины (класс 6).

Однако, согласно результатам идентификации ТС данного двигателя на основе внедренного в эксплуатацию программного обеспечения **GE Comprehensive Diagnostics System** (параметрический метод), никаких признаков начала развития неисправности до 19 августа не было обнаружено. Состоятельность полученного вывода была подтверждена результатами непланового бороскопического обследования (физический метод) газовоздушного тракта двигателя, где было обнаружено разрушение одной лопатки рабочего колеса 4-ой ступени турбины НД.



Рис. 2 Распознавание текущего состояния двигателя CF6-80C2 (с/н 707215) на основе статической нейромодели

Во втором параграфе для оценки степени эффективности разработанной системы диагностирования ТС АГТД на основе комплексного подхода приведены результаты идентификации двигателя ПС90А (с/н 3949853522035), который работал с повышенной вибрацией задней подвески ротора компрессора ВД.

Анализ результатов первого этапа диагностирования, приведенных на рис.3., показывает, что при наработке двигателя $N = 40 \div 50$, наблюдается начало развития неисправности по каналу опор двигателя (область А) и по каналу компрессора (область А1). Повторяемость данной диагностической ситуации была обнаружена при наработках $N = 195 \div 200$ (область С и С1) и $N = 245 \div 250$ (область D

и D1). Однако, согласно действующей методике, составляющей основу программы АСД-90, в рассматриваемый период эксплуатации, работа двигателя ПС90А была оценена без замечаний. Далее, начиная с наработки $N = 245$ (область D), согласно разработанной методике, прогнозируется состояние двигателя (второй этап) с помощью динамической нейромодели двигателя.

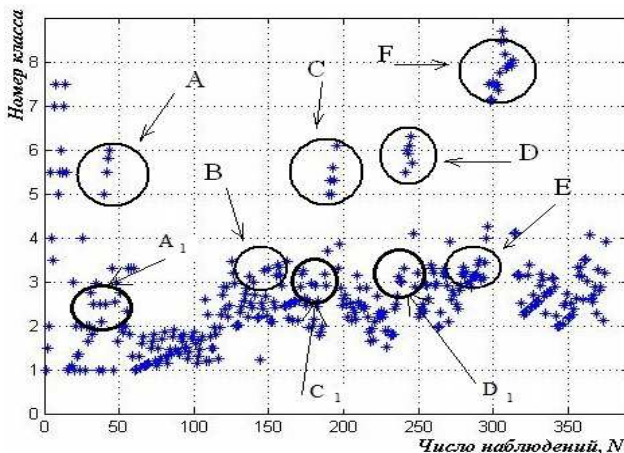


Рис. 3. Распознавание текущего состояния двигателя ПС90А (с/н 3949853522035) на основе статической нейромодели (области A,C,D и A1,C1,D1 – неисправность по каналу опор и компрессора, области B и E – неисправность по каналу компрессора НД и камеры сгорания, область F – реальная неисправность, разрушения задней подвески ротора компрессора высокого давления)

В качестве прогнозируемого параметра выбирается параметр $V_{\text{КВД_ЗП}}$, а входного - параметры T_M и $n_{\text{ВЕН}}$. Анализ результатов прогнозирования параметра $V_{\text{КВД_ЗП}}$ показывает на вероятное развитие неисправности по адресу опор и системы смазки и суфлирования двигателя, что нашло свою состоятельность в дальнейшей эксплуатации двигателя.

Особый интерес представляет наработка двигателя при $N = 145 \div 151$ и $N = 285 \div 289$, где наблюдается вероятность развития неисправности по каналу компрессора НД и камеры сгорания (область

В и Е). Состоятельность данного вывода была подтверждена результатами планового эндоскопического обследования двигателя.

Вышеприведенные результаты идентификации подтверждают необходимость доработок существующих и внедренных в практику регулярной эксплуатации параметрических методов диагностирования ТС АГТД.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментальными исследованиями показано, что в задачах автоматизированного диагностирования и прогнозирования ТС двигателя целесообразно применять комбинацию статических и динамических НС с прямым распространением сигнала.
2. Экспериментальные исследования позволили выработать эффективные подходы к формированию архитектуры статической и динамической нейросетевой модели АГТД в задачах диагностирования.
3. Разработан порядок применения статистических характеристик параметров рабочего процесса АГТД и корреляционно-регрессионного анализа в формировании нейромодели двигателя.
4. Разработаны принципы формирования диагностических признаков ТС АГТД на основе доступных математических моделей и имеющейся информации.
5. Анализ результатов исследований реальных неисправностей двигателей на основе предложенной методики диагностирования ТС АГТД показывает на его эффективность не только в интегрированном виде, но и в индивидуальном применении нейросетевой модели двигателя.
6. Разработана методика оценки ТС АГТД, базирующаяся на эффективной интеграции методов математической статистики и нейронных сетей.
7. Разработана методика принятия решений о ТС АГТД, которая прошла успешные испытания на реальных объектах и была внедрена в практику диагностирования парка двигателей ПС90А, BR710, RB211-535E4 и CF6-80C2, эксплуатирующихся в ООО «Silk Way Airlines» и ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Диагностирование авиационных газотурбинных двигателей с использованием нейронных сетей // *Elmi Məcmuə*, 2006, №3, с. 3-7
2. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Прогнозирование технического состояния авиационных газотурбинных двигателей с использованием нейронных сетей // *Известия Национальной Академии Наук Азербайджана*, 2006, №3, с 152-157
3. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*, ХАИ, 2009, № 5 (62), с. 1-11
4. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д., Якушенко О.С., LVQ–мережа для розпізнавання технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів // *Вісник Національного авіаційного університету*.-Київ, 2007, № 1 (31), с.130 – 133
5. 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”: Материалы конференции. Том 2. Казань: Изд-во Казан. Гос. Тех.ун-та, 2007, с. 3-7
6. 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, 2007 с. 22
7. Мирзоев А.Д. Выбор архитектуры нейронных сетей при диагностировании авиационных газотурбинных двигателей // *Известия Национальной Академии Наук Азербайджана*, 2007, №2-3, с. 184-189
8. Мирзоев А.Д. Применение методов Soft Computing в комплексной системе диагностирования авиационных ГТД / XV Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция: Материалы конференции. Том I. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2007, с. 347-350
9. Мирзоев А.Д. Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*, ХАИ, 2007, № 6 (42), с. 47-59
10. Мирзоев А.Д. Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей / Всероссийская молодёжная научная конференция: Материалы конференции: Том I / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Уфа, УГАТУ 2007, с. 13-14

11. Пашаев А.М., Абдуллаев П.Ш., Якушенко А.С., Мирзоев А.Дж. Нейросетевое распознавание технического состояния авиационных газотурбинных двигателей // Transaction of Azerbaijan National Academy of Sciences, Series of Physical-Technical and Mathematical Sciences: Informatics and Control Problems, Vol. XXVIII, 2008, No.3, p. 3-7
12. Пашаев А.М., Садыхов Р.А., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Идентификация технического состояния авиационного ГТД с применением методов Soft Computing / XIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сборник тезисов докладов Москва, 2008, с. 154-155
13. Пашаев А.М., Шахтаhtинский 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. 344- 347.
14. Пашаев А.М., Шахтаhtинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Система диагностирования авиационного ГТД с применением методов Soft Computing / Матеріали 9 міжнародної науково – технічної конференції «АВИА - 2009». Т.2 – К.: НАУ, 2009, с. 15.43-15.45
15. Пашаев А.М., Шахтаhtинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Дж. Система диагностирования авиационного ГТД с применением методов Soft Computing // Авиационно-космическая техника и технология, ХАИ, 2009, № 9 (66), с. 194-197
16. Шахтаhtинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д., Якушенко А.С. Выбор оптимальной архитектуры нейронной сети для диагностирования АГТД // Milli Aviasiya Akademiyasının elmi əsərləri, 2006, №2, с. 61-67
17. Шахтаhtинский М.Г., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А.Д. Нейронная идентификация технического состояния авиационных газотурбинных двигателей // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, 2005, №2, с. 12-22
18. Abdullayev P.S., Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Mirzoyev A.J. Fuzzy Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engines // Proceeding of IMECE2007: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle, Washington, Paper IMECE2007-43902, 2007, p. 41-54
19. 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 21-st century», «Safety in Aviation and Space Technology», Kyiv, Ukraine, Vol. 1, 2008, p. 13.5-13.6

20. Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S., Sadiqov A., 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.
21. Shaxtaxtinskiy M.G., Abdullayev P.S., Mirzoyev A.C., Yakushenko A.S., Oxmakevich V.N. Application Of Soft Computing Methods In Complex Condition Monitoring System For Aviation Gas Turbine Engines / "АВИА - 2007". T.2. K.: НАУ, 2007, с. 31.14-31.17
22. Shaxtaxtinskiy M.G., Abdullayev P.S., Mirzoyev A.C. Soft Computing Methods in Complex Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engine // Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008». Москва. Тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008, с. 9-10
23. Pashayev A.M., Sadiqov R.A., Abdullayev P.S., Sadiqov A., Mirzoyev A.J. Fuzzy-Neural Approach for Aircraft Gas Turbine Engines Diagnosing // ALAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, Illinois, Sep. 20-22, 2004, AIAA-2004-6222.
24. Р.А. Садыхов, П.Ш. Абдуллаев, А. Дж. Мирзоев, Оценка технического состояния авиационного газотурбинного двигателя с применением методов Soft Computing // Авиационно-космическая техника и технология, ХАИ, 2008, № 9/56, с. 201-206
25. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А. Дж. Математические модели диагностирования авиационных газотурбинных двигателей // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, 2010, №1, с 221-226
26. Abdullayev P.S., Pashayev .M.J., Sadiqov R.A.J., Mirzoyev A.J. Low-Cost Embedded Scouts for Engine Health Monitoring // ISABE 2011 20th Conference, Sustainable and Competitive Aero Engine Research and Technology, September 12-16, 2011, Gothenburg, Sweden
27. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А. Дж., 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
28. Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А. Дж. Порядок интеграции методов математической статистики в задачах формирования архитектуры динамической нейронной сети / Материалы первой международной научно-технической конференции (10-13 марта 2011, г.Черкассы) – Черкассы: Маклаут, 2011, с 77-81
29. Пашаев А.М., Абдуллаев П.Ш., Мирзоев А. Дж., Меликов Э.Т. Порядок интеграции методов математической статистики и нейронных сетей в задачах диагностирования ТС АГТД // Авиационно-космическая техника и технология, ХАИ, № 10 (97), 2012, с.170-176

AZƏR ÇAVANŞİR oğlu MİRZƏYEV
AVİASIYA QAZTURBİN MÜHƏRRİKLƏRİN PARAMETRİK
DİAQNOZLAŞDIRILMASI

XÜLASƏ

Dissertasiya işi aviasiya qaz turbin mühərriklərinin cari istismar şəraitlərində, texniki xidmət və təmir prosesləri zamanı yaranan texniki vəziyyətinin diaqnostika sisteminin işlənməsinin problemlərinə həsr olunmuşdur. Bu problemi həll etmək məqsədi ilə aviasiya qaz turbin mühərriklərinin texniki vəziyyətinin müxtəlif qiymətləndirmə metodlarının üstünlüklərini nəzərə alaraq effektiv diaqnozlaşdırma sisteminin yaradılması və müntəzəm istismar təcrübəsinə tətbiq olunması məqsəd kimi qoyulmuşdur. Burada mühərrikin riyazi modelin, riyazi statistika və neyron şəbəkələri metodlarının integrasiyası vasitəsi ilə diaqnozlaşdırma sistemi işlənmiş və elmi tərəfdən əsaslandırılmışdır.

Bu cür diaqnozlaşdırma sisteminin yaradılması üçün müxtəlif dinamik və statik neyron şəbəkələrin xarakteristikalarının eksperimental müşahidələri əhəmiyyətli rol oynamışdır. Əsas neyron şəbəkəsi kimi siqnalı düz istiqamətdə yayılan neyron şəbəkəsi seçilmişdir.

Baxılan neyron şəbəkənin strukturunun formalaşması məqsədi ilə aktivləşmə funksiyaların formaları tədqiq edilmiş və təyin olunmuşdur, mövcud olan təlim alqoritmlərin tədqiqatları aparılmış və onların nəticəsi əsasında kombinə edilmiş təlim alqoritmı təklif olunmuşdur. Neyron şəbəkəsinin effektiv strukturu giriş və çıxış fəzalarının dəqiqləşdirilməsinin yeni yanaşması əsasında formalaşdırılmışdır. Təqdim olunan diaqnozlaşdırılma sisteminin effektivliyinin qiymətləndirilməsi məqsədi ilə aviasiya qaz turbin mühərriklərinin neyroşəbəkə modellərinin adekvatlığının yoxlanılması üçün meyarlar işlənmişdir.

İşlənmiş diaqnozlaşdırma sisteminin reallaşdırılması məqsədi ilə aviasiya qaz turbin mühərriklərinin texniki halının qiymətləndirilməsi və istismar qərarlarının qəbul olunması üçün alqoritmlər işlənmişdir. Diaqnozlaşdırılma metodikası “Silk Way Airlines” ASC-nin və “Azərbaycan Hava Yolları” QSC – nin mühərrik parkında istismar olunan PS90A, RB211-535E4 və CF6-80C2 mühərriklərinin diaqnozlaşdırılması təcrübəsində tətbiq olunmuşdur.

MIRZOYEV AZER JAVANSHIR
AVIATION GAS TURBINE ENGINE PARAMETRIC
DIAGNOSTICS

SUMMARY

The dissertation is devoted to the problems of aviation gas turbine engine technical condition diagnostics system development in current engine utilization and their place, and the requirement for the maintenance and repair process. For solving this problem, the working out and implementing to the regular operation practice of an effective aviation gas turbine engine diagnostics system using the individual methods advantages is dissertation goal. There are worked out and science-based the aviation gas turbine engine diagnostic system based on the engine mathematics model, mathematics statistics and neural networks methods.

For creating such systems were preceded the experimental studies of the various static and dynamic neural networks characteristics. The based neural network is chosen the feedforward backpropagation neural networks.

In order to form neural network architecture the activation functions shape has been investigated and considered, also by studying the existing learning algorithms features has been developed combined algorithm for leaning neural model of aviation gas turbine engine. The effective structure of neural network has been reached by new forming approach of the input and output spaces. For evaluation of the proposed diagnostic system effectiveness the criteria of aviation gas turbine engine neural model adequacy checking is worked out.

In order to realize the worked out diagnostic system was also developed the algorithms of evaluation and decision applying concerning aviation gas turbine engines technical condition. The worked out diagnostic system has been implemented into PS90A, RB211-535E4 and CF6-80C2 engines fleet diagnostic practice operated in OJSC "Silk Way Airlines" and CJSC "Azerbaijan Airlines".

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

Əlyazma hüququnda

AZƏR CAVANŞİR oğlu MİRZƏYEV

**AVİASIYA QAZTURBİN MÜHƏRRİKLƏRİNİN PARAMETRİK
DİAQNOZLAŞDIRILMASI**

Ixtisas: 3352.01 - "Hava nəqliyyatının istismarı"

**Texnika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyanın**

A V T O R E F E R A T I

BAKİ - 2013