

На правах рукописи

Тяпкин Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕЖРОТОРНОГО
ПОДШИПНИКА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА
АЛ-31Ф НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ВИБРОСИГНАЛА**

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Курск 2022

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре космического приборостроения и систем связи

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Мухин Иван Ефимович

Официальные оппоненты: **Попов Алексей Владимирович**
доктор технических наук, доцент, ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», профессор кафедры восстановления авиационной техники (г. Воронеж)

Балакин Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», старший преподаватель кафедры основ радиотехники (г. Москва)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
(г. Москва)

Защита состоится 30 сентября 2022 года в 11⁰⁰ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.029.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета, по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://swsu.ru/upload/iblock/d48/on0q2w2katsh72qyhyg4dcvqip51ecsu/Dissertatsiya-S.A.-Tyapkin.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основной и одной из острейших проблем авиации с момента ее зарождения и до сегодняшнего дня была и остается проблема обеспечения безопасности полетов. Эта проблема свойственна всем видам авиации: гражданской, государственной и экспериментальной. Данная проблема не снизила своей остроты и на сегодняшний день, при современном уровне знаний и технологий, поскольку не имеет окончательного решения. Полет на любом воздушном судне всегда связан с риском авиационного происшествия, с угрозой утраты воздушного судна и гибели людей, находящихся на его борту.

Для разрешения этой проблемы необходим поиск эффективных мер по снижению риска авиационного происшествия (АП) до приемлемого уровня. Причинами АП являются: человеческий фактор – более чем в 50% случаев, природный фактор – 25%, отказ систем воздушного судна (ВС) 17% (в том числе двигателей в гражданской авиации Российской Федерации 13...15%; по данным ИКАО 4%), другие и неизвестные причины – 6%. Решение проблемы сводится к выявлению возможных факторов риска и принятию мер, обеспечивающих устранение, локализацию или существенное снижение влияния таких факторов на авиационную систему.

Авиационный двигатель является ключевым звеном любого летательного аппарата, определяя его лётно-технические характеристики, безопасность, надежность, экономичность и стоимость эксплуатации.

В авиационной отрасли общепризнано, что такое направление авиационного двигателестроения, как сбор и обработка диагностической информации для динамического управления техническим состоянием и оптимизации процедур технического обслуживания двигателей, является одной из 10-ти критических технологий, подлежащих опережающей отработке и созданию научно-технического задела для перспективных турбореактивных двухконтурных двигателей для пассажирских самолётов.

В этой связи, актуальным является поиск новых методов диагностирования технического состояния опорных подшипников авиационных двигателей, позволяющих существенно повысить время прогноза оставшегося ресурса.

В работе рассматривается возможность использования для долгосрочного и эффективного прогноза технического состояния межроторного подшипника двигателей семейства АЛ-31Ф анализа вибросигнала с помощью одного из показателей нелинейной динамики – фрактальной размерности вибросигнала.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему времени имеется большой объём публикаций в области вибродиагностирования, которые основаны на зависимости параметров вибрации от времени, частоты или пространственной координаты. В области методов вибродиагностирования необходимо отметить работы таких отечественных и иностранных учёных, как: Ф.Я. Балицкого, М.Д. Генкина, А.Г. Соколовой, М.А. Ивановой, Е.И. Хомякова; А.В. Баркова; И.А. Биргера; С. Брауна и Б. Датнера; Л.Д. Вильнера; А.С. Гольдина; Р. Дайера-Стюарта; С.М. Дорошко; Д. Мэтью и Р. Альфредсона; М.К. Сидоренко; Д.И. Тейлора; К.Н. и А.К. Явленских.

Хорошо известны работы отечественных учёных Г.К. Германа, И.В. Егорова, С.Л. Звонарёва, И.О. и А.И. Зубко, С.А. Исаева, В.А. Карасёва, Б.Б. Коровина, В.Б. Короткова, М.К. Леонтьева, И.Е. Мухина, А.А. и С.А. Полозовых, Н.Н. Сиротина, В.В. Червонюк в области вибродиагностирования авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Однако, в действующем Регламенте диагностического контроля двигателей семейства АЛ-31Ф многие из описанных направлений вибродиагностирования не нашли своего применения. Из параметров, зависящих от времени, используется только среднее квадратическое значение (СКЗ) вибросигнала, а в цифровых системах анализа полётных данных (ПО «СКАТ», цифровые регуляторы двигателя) дополнительно – среднее (базовое, эталонное) значение, дисперсия, различные нестабильности вибросигнала, построение тренда. Полностью отсутствуют частотные и пространственные виды анализа.

Во второй половине XX века было открыто и начало интенсивно развиваться направление нелинейной динамики, которое позволяет решать задачи технического диагностирования авиационных двигателей, используя для этого сигнал с датчика вибрации.

В 2000-х годах В.И. Мартынов, В.Л. Федяев и Д.Ю. Иванов применили 2-х мерные фазовые пространства вибросигнала для визуального определения границ между качественно различными состояниями объекта, прогнозируя развитие того или иного дефекта; А.И. Прыгунов использовал для вибродиагностирования подшипника скольжения реконструкцию 3-х мерной фазовой траектории вала морского судна по вибросигналу с помощью метода задержки; Ю.Н. Кликушин разработал теорию идентификационных измерений, соответствующие программные инструменты и применил их (с участием автора) для вибродиагностирования ГТД.

Известна работа Р.С. Ахметханова (2009 г.) о возможности использования фрактальных показателей (корреляционной размерности, показателя Хёрста, совместный фрактальный и вейвлет-анализ) для диагностирования сложных механических систем, но в ней не приводятся конкретные признаки дефектов, что не позволяет использовать приведённую информацию для обработки вибросигнала.

Тем самым сегодня имеются алгоритмы и программы для анализа сложных процессов с помощью показателей нелинейной динамики, которые можно применить для решения задач технического диагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф. Однако имеющиеся публикации, патенты и разработки не содержат информацию о возможности использования показателей нелинейной динамики для технического вибродиагностирования опорных подшипников ГТД. Исследование этого направления находится в начальной стадии и требует своего дальнейшего развития.

Объектом исследования являются вибросигналы со штатных датчиков вибрации двигателей семейства АЛ-31Ф, записанные в бортовое устройство регистрации.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы вибродиагностики технического состояния межроторного подшипника двигателей семейства АЛ-31Ф.

Целью диссертационной работы является обеспечение долгосрочного прогноза технического состояния межроторного подшипника двигателей семейства АЛ-31Ф с достоверностью не ниже 0,9 и низкой условной вероятностью ложного отказа на основе одного из показателей нелинейной динамики – фрактальной размерности вибросигнала.

Задачами диссертационной работы являются:

- статистическая обработка экспериментально полученных массивов вибросигналов двигателей семейства АЛ-31Ф с установлением зависимости значений корреляционной размерности вибросигнала при нахождении межроторного подшипника (МРП) в трех основных состояниях (исправное, промежуточное, предотказное) и определением признакового пространства этих состояний;

- разработка диагностической модели вибросигнала двигателей, у которых МРП может находиться в исправном, промежуточном и предотказном состояниях. Установление взаимосвязи между явлением снижения корреляционной размерности вибросигнала при ухудшении технического состояния подшипника и формой плотности распределения амплитуды вибросигнала;

- разработка помехоустойчивого алгоритма решающего правила выдачи диагностических сигналов, позволяющего устранить влияние факторов, не относящихся к техническому состоянию подшипника;

- разработка метода диагностирования межроторного подшипника газотурбинных двигателей семейства АЛ-31Ф по показателю структуры вибросигнала, позволяющего с высокой достоверностью прогнозировать отказ двигателя за 8...9 полётов до разрушения МРП;

- определение направлений дальнейших работ в области совершенствования технического вибродиагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф на 2024...2032 гг.

Методы исследования. Результаты работы получены на основе методов нелинейной динамики, теории вероятностей, математической статистики, идентификационных измерений и теории распознавания.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый диагностический признак технического состояния («исправен», «перед отказом») межроторного подшипника, которым в отличие от известных является величина размерности вибросигнала (количество определяющих вибросигнал факторов). Установлено, что средние значения размерности вибросигнала по 28-ми выборкам в каждом из состояний составляют соответственно 2,77 и 2,38 ед. с доверительной вероятностью различия этих значений 99,8%.

2. Разработаны 4 альтернативные диагностические модели вибросигнала, позволяющие в отличие от известных имитировать сигналы с различной корреляционной размерностью. Выбрана наиболее целесообразная основная

диагностическая модель, которая подтверждена экспериментально и успешно использована для поиска и применения других перспективных алгоритмов вибродиагностирования.

3. Впервые выявлена зависимость разработанного на основе алгоритма корреляционной размерности показателя структуры вибросигнала (P_{str}) от времени задержки при его разложении в многомерном пространстве, позволившая осуществить фильтрацию величины P_{str} от влияния 10...15 посторонних факторов и реализовать решающее правило диагностирования МРП с высокими качественными характеристиками при ограниченном числе исходных данных.

4. Впервые разработан метод диагностирования межроторного подшипника газотурбинных двигателей семейства АЛ-31Ф по показателю структуры вибросигнала, у которого время прогноза отказа двигателя в 4 раза выше (5...8 полётов), чем у используемых ныне методов вибродиагностирования, при достоверности диагностирования 0,94 и удовлетворительной условной вероятности ложного отказа.

Теоретическая значимость работы заключается в обнаружении и использовании ранее не известных фундаментальных явлений, которые заключаются в снижении фрактальной размерности вибросигнала и изменении формы закона распределения его амплитуды с нормальной на равномерную при ухудшении технического состояния межроторного подшипника авиационного двигателя с исправного до предотказного. Первый диагностический признак положен в основу принципиально нового метода вибродиагностирования, а второй позволил математически смоделировать вибросигнал двигателей с различным техническим состоянием МРП и за счет этого реализовать задел для дальнейшего развития темы.

Практическая значимость работы состоит в разработке метода диагностирования МРП двигателей семейства АЛ-31Ф по показателю структуры вибросигнала P_{str} , который:

1) имеет высокие качественные характеристики (условная вероятность пропуска отказа 0,06 при вероятности ложного дефекта от 0,0 до 0,4 и среднем времени прогноза до разрушения подшипника 5...8 полётов) и удовлетворительное время обработки данных на ПК - 2 мин/полёт, что открывает возможность удалённого диагностирования МРП и прогнозирования отказа двигателя;

2) использует в качестве исходных данных файлы вибросигнала, записанные бортовым устройством регистрации самолёта без дополнительных вложений средств на модернизацию наземного и бортового оборудования;

3) позволяет в отношении МРП ограничить применение других методов диагностирования и снизить стоимость ТО за счет «свёртки» дефектов подшипника (трещины, сколы, раковины, величина износа) и показателей других методов диагностирования (акустического, анализа масла, измерений момента расцепления/биения роторов и времени выбега) в один интегральный показатель технического состояния двигателя – P_{str} вибросигнала перед его отказом;

4) внедрён для использования в АО «НПП «Топаз», которое является поставщиком аппаратных и программных средств обеспечения объективного

контроля воздушных судов для государственной и экспериментальной авиации России и авиации зарубежных заказчиков;

5) подтверждён при обработке данных испытаний шарикового подшипника с осевой нагрузкой 2500 кгс до естественного повреждения на стенде ЦИАМ, что открывает широкие перспективы использования фрактальной размерности вибросигнала при поиске решений в области управления техническим состоянием и оптимизации процедуры технического обслуживания авиационных и конвертированных ГТД любых типов.

Личный вклад автора: основные результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель внёс основной вклад при постановке и решении задач в отношении вибросигнала авиационных двигателей.

Положения, выносимые на защиту:

1) Ухудшение технического состояния подшипника от исправного к предотказному характеризуется изменением формы плотности распределения случайного сигнала, модулирующего по амплитуде роторные гармоники вибросигнала, от нормальной к равномерной, что обеспечивает возможность в качестве индикатора этих изменений использовать показатель размерности;

2) Использование в качестве диагностического признака технического состояния межроторного подшипника показателя корреляционной размерности вибросигнала позволяет различать исправные подшипники от подшипников в предотказном состоянии с доверительной вероятностью 99,8%;

3) Показатель структуры вибросигнала, разработанный на основе алгоритма корреляционной размерности, позволяет устранить влияние на вибросигнал факторов, не относящихся к техническому состоянию подшипника, тем самым определяя высокие характеристики технического диагностирования;

4) Разработанный метод вибродиагностирования межроторного подшипника газотурбинных двигателей семейства АЛ-31Ф на основе показателя структуры вибросигнала позволяет за 5...8 полётов до разрушения подшипника прогнозировать отказ двигателя с высокими качественными характеристиками (условными вероятностями необнаруженного и ложного отказа), без привлечения других методов диагностирования, при необходимости – удалённо.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных автором научных и практических результатов определяется:

1) доверительной вероятностью различий выборочных средних корреляционной размерности вибросигнала двигателей, у которых межроторный подшипник находится в 3-х различных состояниях: исправном, промежуточном и предотказном. Установлено, что различие корреляционной размерности вибросигнала у исправных и предотказных подшипников соответствует доверительной вероятности 99,8%, у предотказных и подшипников в промежуточном состоянии – 97%.

2) применением математического аппарата нелинейной динамики, который используется во многих областях науки и техники;

3) совпадением результата математического моделирования вибросигнала двигателей с различным техническим состоянием МРП с экспериментально наблюдаемыми данными;

4) проведением в анонимном режиме испытаний на реальных полётных данных со случаями разрушения опорных подшипников, показавшими высокие качественные характеристики метода диагностирования МРП по показателю структуры P_{str} вибросигнала: достоверность 0,94, время прогноза разрушения подшипника 5...8 полётов, условные вероятности пропуска и ложного отказа 0,06 и 0,0...0,38 (в зависимости от времени прогноза).

Основные результаты работы представлены в ведущих журналах, а также докладывались и обсуждались на: научно-технических семинарах ПК «Салют» АО «ОДК», 2013 и 2017 гг., Москва; научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки», 2017 г., Воронеж; семинаре «Проблемы механики сплошной среды» в Институте проблем механики РАН, 2018 г., Москва; Всероссийской научно-технической конференции «Инженерно-физические проблемы новой техники» в МГТУ им. Баумана, 2020 г., Москва; научно-технической конференции «Инфокоммуникационные и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения» в ЮЗГУ, 2020 г., Курск; Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям ICAM-2021, Москва; научно-технических семинарах кафедры космического приборостроения и систем связи ЮЗГУ, 2020-2022 гг., Курск.

Публикации. По тематике исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 1 статья в журнале, индексируемом в системе Word of Science; получен 1 патент на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 124 страницы текста, 30 рисунков, 14 таблиц, 30 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу требований к перспективным системам диагностирования авиационных двигателей.

Современная система управления безопасностью полётов (СУБП) в отличие от предыдущей модели акцентировала внимание не на ожидании негативного события (ошибочные действия, инциденты, аварии, катастрофы), а на заблаговременном выявлении (идентификации) возможных опасностей и их факторов в деятельности авиакомпании, которые уже существуют, но еще не проявились и могут стать причиной инцидентов, аварий и катастроф. Такой подход в профилактике авиационных происшествий, получил название про-активный.

В качестве примера соответствия современным требованиям СУБП рассмотрен Регламент диагностического контроля двигателя (РДКД) семейства АЛ-31Ф. Для перевода двигателей семейства АЛ-31Ф полностью на эксплуатацию по состоянию требуется проведение организационных и технических мероприятий,

одним из которых является обеспечение эффективного прогнозирования его технического состояния.

Отечественный и иностранный опыт подтверждает целесообразность перевода системы эксплуатации двигателей на контракт жизненного цикла (PBL/КЖЦ), основным механизмом которого является наряду с интегральной логистикой, квалифицированными сотрудниками и материально заинтересованными исполнителями работ - прогнозирование технического состояния на основе эффективных методов диагностирования.

Основная задача РДКД двигателей семейства АЛ-31Ф – предотвратить внезапный отказ двигателя за счет разрушения опорных подшипников. Для этого при их эксплуатации применяются известные методы диагностирования, эффективность которых проверена и подтверждена: виброакустический, проверки момента расцепления и биения роторов двигателя в ходе их ручной прокрутки, анализ масла на посторонние включения и химический состав, измерение времени выбега роторов, контроль и анализ вибросигнала. При этом вибродиагностирование играет второстепенную роль и в обязательном порядке должно быть подтверждено методами, стоящими в этом списке впереди него.

Причиной такого положения является зависимость амплитуды вибросигнала от множества факторов. В результате условная вероятность ложного отказа при использовании только сигналов вибродиагностирования недопустимо велика и для определения технического состояния опорных подшипников необходимо использовать комплекс методов. Но и в этом случае задачу эффективного долговременного прогнозирования технического состояния опорных подшипников пока решить не удалось.

В отношении вибродиагностирования задача прогнозирования технического состояния опорных подшипников может быть решена путём широкого использования в средствах технического диагностирования компьютерных технологий, для чего необходим поиск новых методов вибродиагностирования. Одним из них является анализ вибросигнала с помощью показателей, разработанных нелинейной динамикой.

Во второй главе рассмотрены вопросы математического моделирования вибросигнала двигателя, межроторный подшипник которого находится в исправном, промежуточном и предотказном состоянии и диагностического признака предотказного состояния подшипника.

В соответствии с темой исследования основной задачей математического моделирования является имитация вибросигнала, который изменяет свою фрактальную размерность в зависимости от технического состояния межроторного подшипника. Первоначально закономерности в поведении этого параметра были обнаружены экспериментально в ходе обработки полётных данных реальных полётов (рисунок 1).

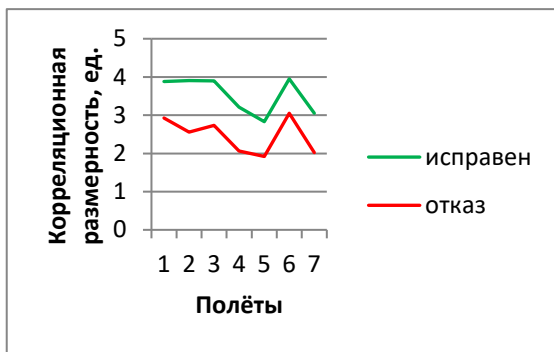


Рисунок 1 – Размерность вибросигнала, измеренная корреляционным способом, в серии из 7-ми полётов с разрушением МРП

Получить сигналы с дробной фрактальной размерностью позволяют системы дифференциальных уравнений, описывающие хаотические динамические системы. Кроме того, зависимость размерности данных D от показателя Хёрста H известна для уравнения обобщённого броуновского движения на плоскости:

$$D = 2 - H.$$

Следовательно, для моделирования вибросигнала можно обратиться к системам уравнений хорошо известных нелинейных динамических систем Лоренца и Рёсслера, либо использовать генератор сигнала

обобщённого броуновского движения с различными показателями Хёрста H .

Анализ динамических систем Лоренца и Рёсслера показал, что они в хаотическом режиме формируют фазовые траектории с фиксированными фрактальными размерностями 2,54 и 2,06, а форма плотности закона распределения амплитуды сигнала имеет сложный вид. Эти параметры формируемых сигналов изменены быть не могут, что ограничивает их использование, но в то же время позволяют в случае необходимости строить динамические модели сигналов с различными размерностями.

Лучшими возможностями обладает уравнение обобщённого броуновского движения на плоскости. В таблице 1 приведены значения корреляционной размерности и формы закона распределения (S-тестера) смоделированного сигнала при изменении показателя Хёрста H .

S-тестер представляет собой программный инструмент, разработанный в Омском ГТУ для непосредственного измерения закона распределения случайных сигналов. Его идентификационная характеристика приведена в таблице 2, в которой для обозначения случайных сигналов используются сокращения, принадлежащие словарю имен симметричных распределений: двумодального (2mod), арксинусного (asin), равномерного (even), треугольного (simp), нормального (gaus), двустороннего экспоненциального (lapl) и Коши (kosh).

Согласно таблицам 1 и 2 при уменьшении корреляционной размерности сигнала обобщённого броуновского движения с 3,79 ед. до 1,02 ед. через 1,22 форма плотности распределения изменяется от близкой к нормальной (gaus) к равномерной (even) через треугольную (simp). Это предположение подтверждается экспериментальными данными, согласно которым при ухудшении технического состояния МРП снижается размерность вибросигнала (рисунок 1) и одновременно изменяется форма закона распределения амплитуды вибросигнала (рисунок 2).

Таблица 1 - Корреляционная размерность и форма закона распределения сигнала (по значению S-тестера) обобщенного броуновского движения с различными H

Модель сигнала		Характеристики сигналов	
		Корреляционная размерность ($\tau=1, n=2\dots 20$), ед.	Плотность распределения (S-тестер), %
Обобщенное броуновское движение	$H=0,1$	3,79	39
	$H=0,5$	1,22	60
	$H=0,9$	1,02	70

Таблица 2 - Идентификационная характеристика S-тестера

Шкала S-тестера	Вид распределения случайного сигнала						
	2mod	asin	even	simp	gaus	lapl	kosh
$S, \% (N=10000)$	100	92,3	75	51	31,7	15,3	0,06
$\Delta\varepsilon, \%$, при $p=0,95$	0	0,56	1,07	2,08	9,5	18,3	167

При этом значимых изменений показателя Хёрста H при обработке полётных данных с разрушенными подшипниками не обнаружено, что позволяет предположить о прямой зависимости размерности сигнала от формы закона распределения амплитуды.

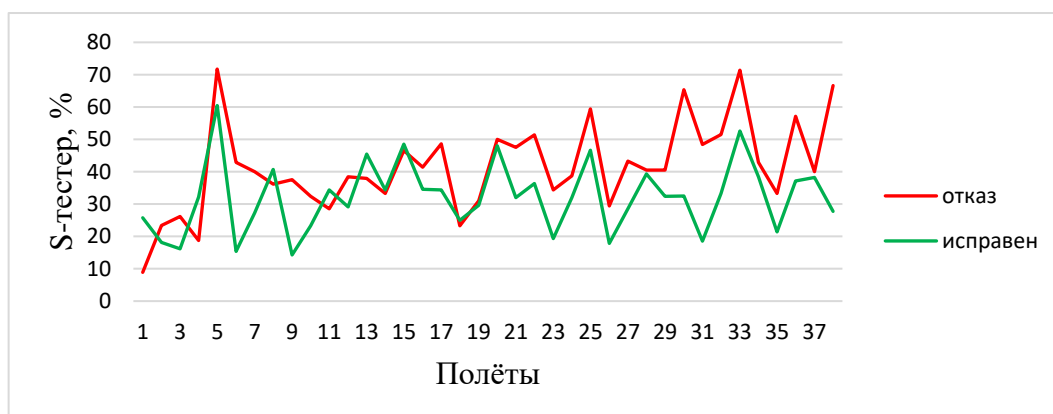


Рисунок 2 – Сравнение значений S-тестера для вибросигналов исправного и отказавшего подшипников в серии из 38 полётов

Связь размерности случайных сигналов с формой закона распределения, установленная с помощью модели обобщенного броуновского движения, позволяет построить математическую модель вибросигнала при разрушении МРП в виде суммы двух роторных гармоник и случайного сигнала (шума) с нормальным, треугольным и равномерным законами распределения амплитуды (таблица 3).

Данная стохастическая (вероятностная) диагностическая модель вибросигнала выбрана основной, т.к. она:

- имитирует реальный спектральный состав вибросигнала двигателя АЛ-31Ф (рисунок 3) в полосе частот 50...250 Гц, состоящий из двух гармоник на частотах вращения роторов двигателя (f_1, f_2) и случайного сигнала;

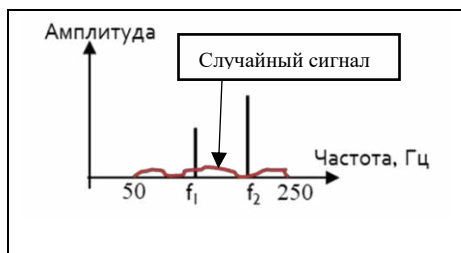


Рисунок 3 – Спектральный состав вибросигнала АЛ-31Ф

- моделирует зависимость корреляционной размерности вибросигнала от технического состояния МРП (исправен, промежуточное, предотказное) путём изменения закона распределения модулирующего случайного сигнала (таблица 3);

- подтверждается экспериментально (рисунок 2).

Таблица 3 – Зависимость корреляционной размерности модели вибросигнала от формы закона распределения амплитуды

Модель сигнала	Техническое состояние МРП	Характеристики сигналов	
		Формула	Корреляционная размерность D , ед. ($\tau=1, n=2\dots 20$)
$\sin(\omega t) + \text{шум}$	исправен	$5(\sin(\omega t) + \sin(0.7\omega t)) + \text{gaus}(t)$	3,26
	промежуточное	$5(\sin(\omega t) + \sin(0.7\omega t)) + \text{simp}(t)$	2.2
	предотказное	$5(\sin(\omega t) + \sin(0.7\omega t)) + \text{even}(t)$	2.0

Основная диагностическая модель вибросигнала позволяет установить, что причиной изменения размерности вибросигнала является смена формы закона распределения его амплитуды в направлении нормальный \rightarrow равномерный.

Данный факт говорит о возможности использования S-тестера в комплексе контролируемых диагностических параметров совместно с корреляционной размерностью D . Он также позволил при поиске перспективных алгоритмов вибродиагностирования обратить внимание на такие методы анализа вибросигнала, как WTMM (максимальный модуль вейвлет-преобразования) и MF DFA (мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ), связанные с оценкой формы распределения сигналов. Работоспособность этих алгоритмов в целях вибродиагностирования МРП сегодня подтверждена.

Диагностическая модель вибросигнала при различных состояниях межроторного подшипника и диагностический признак состояния МРП представлены на рисунке 4. Диагностическим признаком состояния подшипника является размерность вибросигнала D , когда подшипнику в исправном состоянии соответствует размерность 3...4 ед., предотказном – 1,5...2 ед. и в промежуточном – 2,1...2,9 ед.

В третьей главе:

- рассмотрен алгоритм вычисления корреляционной размерности вибросигнала;
- путём статистических испытаний определено пространство диагностических признаков технического состояния межроторного подшипника, находящегося в 3-х состояниях: исправном, промежуточном и предотказном;

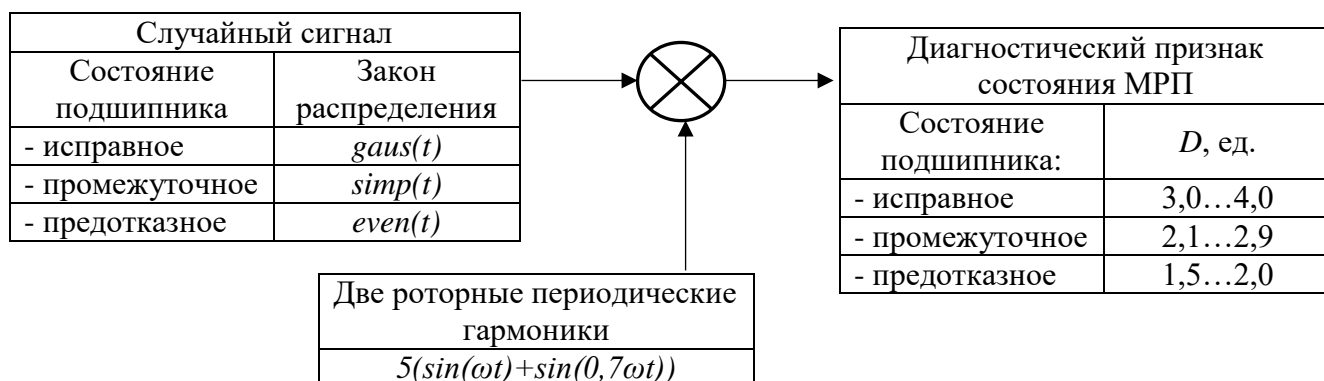


Рисунок 4 – Диагностическая модель вибросигнала и диагностический признак состояния МРП

- исследована возможность применения различных решающих правил для вибродиагностирования межроторных подшипников двигателей АЛ-31Ф с использованием текущих измерений, последовательных измерений с зоной неопределенности и с использованием показателя структуры вибросигнала P_{str} .

Алгоритм вычисления корреляционной размерности D_2 разработан в 1983-1985 гг. Грасбергером-Прокаччио-Такенсом. В его основе находятся несколько положений:

1. Разложение одномерного сигнала одной из координат динамической системы (в нашем случае это уровень вибрации) в 2-х, 3-х и далее до 10...20-ти мерного ряда с задержкой τ . Задержку необходимо выбрать такой, при которой между двумя соседними отсчетами корреляционная связь была бы мала.

2. Для каждого n -мерного ряда ($n = 2...10$) путём парного перебора имеющихся N точек рассчитывается их среднее количество, которые находятся на расстоянии меньше r , которое берётся в диапазоне от r_{min} до r_{max} исходного временного ряда:

$$m_r = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - \|x_i - x_j\|),$$

при этом принимается, что:

$$m_r \approx r^{D_2}.$$

По этим данным строится график в двойных логарифмических координатах:

$$\log m_r \approx D_2 * \log r,$$

откуда корреляционная размерность D_2 находится путём логарифмирования как угол наклона линейно аппроксимированной кривой.

3. Число координат разложения увеличивается с 2-х до 10-ти. Если исследуемый процесс является шумом, то D_2 с увеличением n должен возрастать не ограничиваясь. Это определяется тем, что согласно центральной предельной теоремы шум с нормальным распределением является суммой достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы.

Если процесс определяется небольшим числом детерминированных факторов, то график зависимости D_2 от n будет сначала возрастать, потом войдет в насыщение (плоская вершина) или будет снижаться. Это значит, что увеличение числа координат вложения не приводит к росту величины D_2 и эта величина характеризует размерность исследуемой динамической системы.

Во второй части третьей главы описываются планирование, исходные данные и результаты эксперимента по статистической обработке данных реальных полётов самолётов с двигателями семейства АЛ-31Ф со случаями остановки одного из двигателей в полёте по причине разрушения опорного подшипника.

Для исследования использованы серии из 12 полётов, выполненные каждым из 7 двигателей: 4 полёта непосредственно перед разрушением опорного подшипника (предотказное состояние), 4 полёта перед ними (промежуточное состояние) и 4 более ранних полёта (исправное состояние). Данные крайних полётов, в которых произошло разрушение подшипника, из рассмотрения исключены.

Таким образом (таблица 4), созданы 3 выборки по 28 полётов каждая, что позволяет сопоставить корреляционную размерность вибросигнала (КРВ) двигателей с исправными подшипниками, находящимися в промежуточном и предотказном состоянии.

Каждый полёт представляет собой 2400...3600 значений уровня вибросигнала с датчика вибрации, что соответствует 40...60 мин полёта самолёта с частотой записи сигнала 1 Гц. По этим данным вычисляется корреляционная размерность вибросигнала (КРВ) за полёт по методу задержки с параметрами: число координат вложения $n = 10$, задержка $\tau = 75$.

Статистические характеристики, полученные в ходе исследования, приведены в таблице 5.

Таблица 4 - План исследования

Входные данные	Состояние опорного подшипника		
	исправное (4 полёта)	промеж. (4 полёта)	пред-отказное (4 полёта)
Двигатели №1...7	7 x 4 = 28 наблюдений	7 x 4 = 28 наблюдений	7 x 4 = 28 наблюдений

Таблица 5. Статистические характеристики выборочных средних корреляционной размерности вибросигнала (КРВ)

Характеристика	Состояние опорного подшипника		
	исправное	промеж.	пред-отказное
Выборочное среднее КРВ	2,77	2,66	2,38
Доверительный интервал (0,95)	± 0,17		

Уровни значимости, с которыми различаются средние КРВ в зависимости от состояния подшипника, и с которыми нулевую гипотезу о неразличимости средних значений выборок следует отвергнуть, приведены в таблице 6. Тем самым установлено, что корреляционная размерность вибросигнала зависит от технического состояния опорных подшипников двигателя с большой достоверностью.

Таблица 6 – Уровни значимости различия средних КРВ

Уровни значимости различия средних КРВ (доверительная вероятность)	
исправен-перед отказом	0,002 (99,8%)
промеж.-перед отказом	0,03 (97%)
исправен-промеж.	0,4 (60%)

значений выборок следует отвергнуть, приведены в таблице 6. Тем самым установлено, что корреляционная размерность вибросигнала зависит от технического состояния опорных подшипников двигателя с большой достоверностью.

В третьей части главы 3 на основе полученных результатов анализируются различные способы формирования решающих правил определения состояния подшипника.

Исходя из полученных в ходе статистических исследований данных (таблица 5) для использования текущих наблюдений для диагностирования подшипника с условными вероятностями пропуска отказа $\alpha = 0,05$ и ложного отказа $\beta = 0,1$ необходимо не менее 19 наблюдений (полётов), причём состояние подшипника в течение этого времени не должно изменяться. Так как межроторный подшипник разрушается за значительно меньшее количество полётов (5...8), успешно использовать этот способ невозможно.

Известно, что методика последовательных наблюдений с зоной неопределённости позволяет снизить число наблюдаемых полетов по сравнению с предыдущим в среднем в два раза. Для этого на графике после каждого полёта отмечают точку: по оси X - последовательность наблюдаемых полётов, по оси Y сумму КРВ в этих полётах. В плоскости графика имеется также две прямые a_1 и a_2 : точка находится выше полосы – двигатель исправен, между линиями – полоса неопределённости. Если точка окажется ниже этой полосы, нужно выдать

диагностический сигнал о предотказном состоянии МРП. На рисунке 5 представлен график методики последовательного анализа вибросигнала

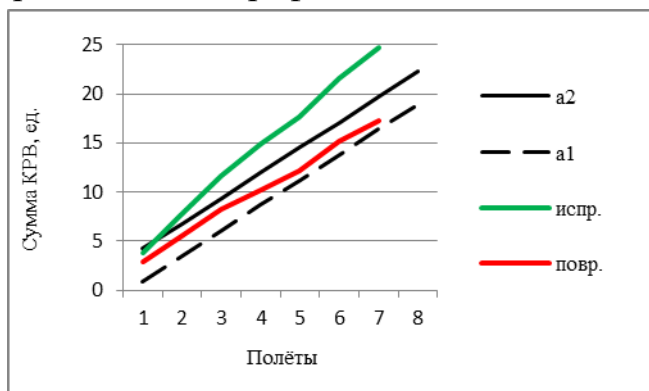


Рисунок 5 - График полосы неопределённости, накопленных КРВ для двигателей с исправным и предотказным опорным подшипником

двигателей самолёта при разрушении МРП на одном из них. Условные вероятности пропуска и ложного отказа равны соответственно 0,05 и 0,1.

Из рисунка 5 следует, что:

- линия двигателя с разрушившимся МРП находится в нейтральной полосе и остаётся в ней;
- состояние подшипника хорошо выявляется по углу наклона линии отказавшего двигателя в

сравнении с границами нейтральной области;

- выдачи диагностического сигнала не происходит по той же причине, что и у предыдущего способа.

Для преодоления недостатков рассмотренных способов выдачи диагностических сигналов необходимо отказаться от усреднения КРВ. Для этого разработан показатель, названный показателем структуры вибросигнала P_{str} , имеющий в основе тот же самый алгоритм вычисления, что и КРВ, но, примерно, на порядок больший объём вычисления (2 мин/полёт на ПК с тактовой частотой 2,5 ГГц) и за счет этого являющийся более информативным.

Связь этих двух показателей показана на рисунке 6, где значение КРВ находится на вертикальной оси, а значение P_{str} – на горизонтальной. Если ранее мы определяли КРВ при одном значении $n=10$, то теперь необходимо для каждого

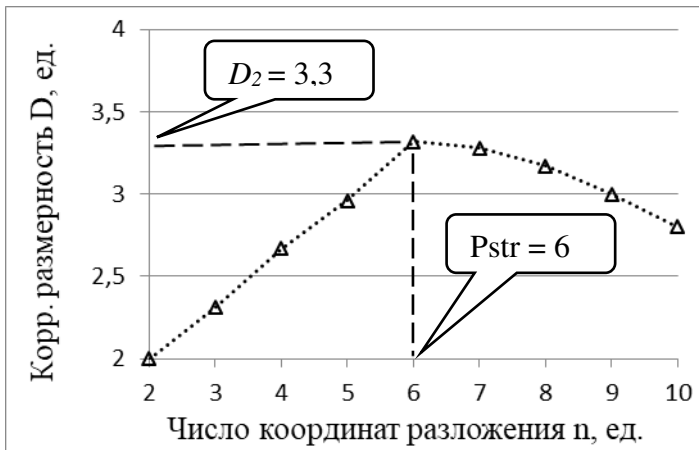


Рисунок 6 - KPB и Pstr после одного из полётов с подшипником в промежуточном техническом состоянии

полёта вычислить KPB при $n=2...10$ и определить n , при котором показатель прекращает рост.

В ходе исследования полётных данных с исправными и отказавшими подшипниками выявлена зависимость значения Pstr от времени задержки τ , используемого при разложении вибросигнала в многомерное пространство. Уменьшая τ , можно достичь такого положения, когда Pstr вибросигнала от исправного подшипника не уменьшается

совсем, либо уменьшается на «минус» 1 ед. и остаётся в полосе Pstr = 9...10 ед., а от отказавшего подшипника - продолжает снижаться до Pstr = 5...8 ед.

Тем самым, осуществляется устранение влияния на величину Pstr всех факторов, не связанных с техническим состоянием МРП. Такими факторами являются: режимы работы двигателя (обороты валов, температуры и давления в различных сечениях), параметры атмосферы (температура, давление) и траектории полёта (высота, скорость и их производные, перегрузки по 3-м координатам) - всего 10...15 факторов.

На рисунке 7 приведён график Pstr вибросигнала в серии из 15 полётов двигателя с отказом МРП и соседнего исправного двигателя при $\tau=25$ ед. Хорошо заметно разница между графиками за счет того, что колебания Pstr у двигателя с исправным подшипником отсутствуют.

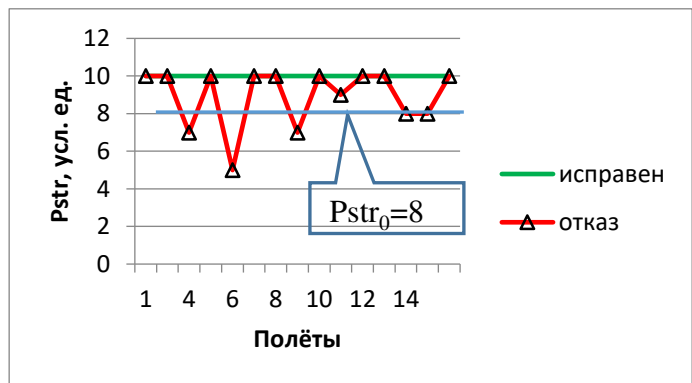


Рисунок 7 – Pstr исправного и отказавшего подшипника

График функций распределения вероятности $f(Pstr)$ для исправного и пред-отказного состояния подшипников, построенных по экспериментально полученным данным при $\tau = 25$ ед., а также графики условных вероятностей пропуска и ложного отказа в зависимости от выбранного в качестве порогового значения Pstr₀ приведено на рисунке 8.

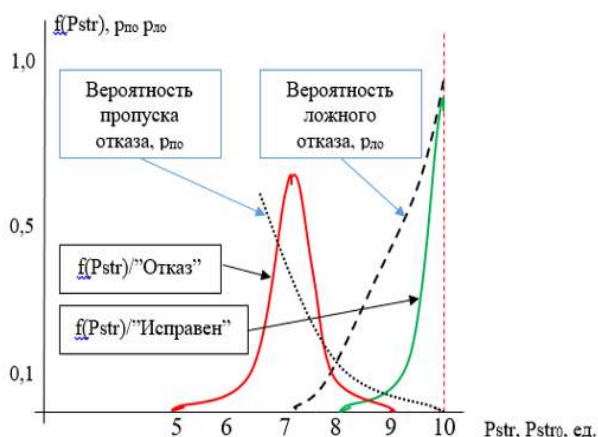


Рисунок 8 - Распределение значений P_{str} при исправном (зелёная кривая) и предотказном (красная кривая) состоянии подшипника при $\tau = 25$ ед.

Используя критерий Неймана-Пирсона (минимальная вероятность пропуска отказа при заданном допустимом уровне вероятности ложного отказа) график на рисунке 8 позволяет определить пороговое значение для решающего правила определения технического состояния подшипника, которым является значение $P_{str_0} = 8$ ед.

Показатель структуры вибросигнала позволяет контрастно выявить различие между вибросигналами исправного и предотказного подшипников и реализовать высокую достоверность диагностирования при малой вероятности ложного отказа.

Решающее правило имеет следующую формулу:

Состояние МРП → { «Исправен», при $P_{str} > 8$ ед.
или время состояния «Доп. контроль» больше 10 полётов;
«Доп. контроль», при поступлении первого сигнала $P_{str} \leq 8$ ед.;
«Неисправен», при поступлении второго сигнала $P_{str} \leq 8$ ед.

Графически пороговое значение на рисунке 7 представляет собой линию на уровне $P_{str_0} = 8$ ед.

В четвёртой главе описан метод диагностирования межроторного подшипника газотурбинных двигателей семейства АЛ-31Ф на основе показателя структуры вибросигнала и результаты его практического применения.

Математическая основа метода диагностирования состояния межроторного подшипника и прогнозирования отказа двигателя включает:

- вектор наблюдаемых параметров, состоящий из одной составляющей – уровня виброскорости СКЗ вибросигнала со штатного датчика вибрации - Вдв;
- вектора диагностических признаков – показателя структуры P_{str} вибросигнала с механизмом устранения влияния факторов, не относящихся к техническому состоянию подшипника;
- вектор формальных видов технического состояния МРП («Исправен», «Доп. контроль», «Неисправен») и алгоритм решающего правила их определения.

Натурные испытания метода по P_{str} осуществлялись в анонимном режиме:

а) отбор и подготовку исходных данных производила независимая организация;

б) предварительная информация об исправности/неисправности двигателей отсутствовала;

с) в исходных файлах имелся только один сигнал – со штатного датчика вибрации. Данные о режимах работы двигателя (обороты, температуры), состоянии атмосферы (температура, давление) и параметров траектории полёта (высота,

скорость, перегрузки) удалены. Какое-либо моделирование уровня вибрации невозможно;

d) исходные данные не содержат крайних полётов, в которых наблюдается рост амплитуды вибросигнала перед отказом МРП/МВП, что позволяет оценить её влияние на Pstr в сравнении с традиционными амплитудными методами вибродиагностирования.

Всего обработаны полётные данные 18-ти двигателей. По ним произведено вычисление показателя структуры вибросигнала Pstr, сформирован вывод о техническом состоянии подшипников, который передан в независимую организацию. Последняя сравнила их с реальным состоянием МРП/МВП, после чего были подсчитаны условные вероятности пропуска отказа и ложного отказа, а также среднее время от выдачи диагностического сигнала до разрушения подшипника.

Показатели эффективности метода диагностирования по первому поступившему сигналу $Pstr \leq 8$ ед. (Pstr-1) и по двум поступившим сигналам $Pstr \leq 8$ ед. (Pstr-2), а также в сочетании с другими методами диагностирования, приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Показатели эффективности диагностирования МРП/МВП

Показатели	Методы диагностирования			
	Pstr		Pstr-2 + СКАТ*	(Pstr-2 + СКАТ) + (ВА+Мрасц)**
	Pstr-1	Pstr-2		
	Только МРП		МРП + МВП	
Достоверность диагностирования	0,94	0,94	≈1,0	≈1,0
Усл. вероятность пропуска отказа	0,06	0,06	≈0,0	≈0,0
Усл. вероятность ложного отказа	0,38	≈0,0	≈0,0	≈0,0
Продолжительность и трудоёмкость диагностирования	2 мин /полёт (ПК)		2+6 мин/полёт (ПК)	8 мин/полёт (ПК) +1,5 чел-час/2 чел.
Среднее время прогноза	МРП	8 полётов	5 полётов	5 полётов
	МВП	не обеспечивается		1 полёт до 100 ч наработки

Примечание - *СКАТ – программное обеспечение наземного комплекса обработки полётной информации «Топаз-М»;
 **ВА+Мрасц – виброакустический контроль и проверка момента расцепления при ручной прокрутке роторов двигателя.

Особенностью метода диагностирования по Pstr явилось отсутствие реакции на повреждение межвальных подшипников (МВП), что является важным отрицательным, но ожидавшимся результатом. Причиной такого положения является совершенно другой механизм разрушения МВП, связанный не с блокировкой тел качения между кольцами при нагреве подшипника, а с их проскальзыванием из-за недостаточной нагрузки.

В отношении МРП эффективность диагностирования по Pstr составила:

a) Pstr-1 – достоверность диагностирования 0,94, вероятность ложного дефекта - 0,38, среднее время прогноза до отказа МРП - 8 полётов;

b) Pstr-2 - достоверность диагностирования сохраняется на прежнем уровне (0,94), но исключаются ложные диагностические сигналы. При этом снижается время прогноза до 5-ти полётов;

с) Pstr-2 + СКАТ наземного комплекса обработки полётной информации «Топаз-М» (разработчик и поставщик АО «НПП Топаз») позволяет достичь в отношении МРП предельных значений показателей и характеристик технического диагностирования, т.к. они дополняют друг друга;

d) набор методов Pstr-2 + СКАТ + ВА + Мрасц необходим для диагностирования состояния МВП, эффективность которого остаётся на текущем уровне.

Основной достигнутый результат метода диагностирования по Pstr вибросигнала – увеличение в 4 раза времени от выдачи диагностического сигнала о предотказном состоянии МРП до отказа двигателя при достоверности диагностирования более 0,9, что открывает возможность работы в удалённом режиме без привлечения других методов диагностирования.

Проведённое исследование позволяет спрогнозировать направления дальнейшего развития РДКД, которые заключаются в переносе на бортовые вычислительные средства максимально возможного количества задач анализа вибросигнала, использовании разработанного и перспективных программных модулей, работающих по данным, имеющимся сегодня в бортовых устройствах регистрации самолёта, и использовании методов диагностирования, предполагающих анализ данных с высокой частотой дискретизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. На основе статистической обработки экспериментально полученного массива вибросигналов двигателей семейства АЛ-31Ф получены выборочные средние значения корреляционной размерности вибросигнала для трех основных состояний межроторного подшипника (МРП) (исправное, промежуточное, предотказное), на базе которых определено пространство контролируемых признаков.

2. Разработана основная диагностическая модель вибросигнала двигателей, у которых МРП находится в исправном, промежуточном и предотказном состояниях. Доказано, что снижение корреляционной размерности вибросигнала при ухудшении технического состояния подшипника достигается за счет изменения формы плотности распределения амплитуды вибросигнала, что положено в основу разработки эффективных алгоритмов диагностирования МРП.

3. Разработано решающее правило и алгоритм выдачи диагностических сигналов, в котором применен механизм устранения влияния на размерность вибросигнала 10...15 факторов, не относящихся к техническому состоянию подшипника: в том числе режимы работы двигателя, параметры траектории полета и состояние атмосферы, что позволило реализовать высокую эффективность диагностирования.

4. Разработан метод диагностирования межроторного подшипника газотурбинных двигателей семейства АЛ-31Ф по показателю структуры вибросигнала. Проведенные анонимные натурные испытания метода диагностирования по полетным данным двигателей со случаями разрушения опорных подшипников показали, что достоверность диагностирования составила 0,94; условная вероятность пропуска отказа 0,06; среднее время прогноза отказа МРП составило 5...8 полетов, что в 4 раза выше, чем у существующих методов.

5. Определены направления дальнейших работ в области совершенствования технического вибродиагностирования двигателей семейства АЛ-31Ф на 2024...2032 гг.

Рекомендации. Использование разработанного метода вибродиагностирования возможно в нескольких направлениях:

а) включение в качестве программного модуля в состав ПО «СКАТ» наземного комплекса обработки полётной информации «Топаз-М», применяемого в организациях, эксплуатирующих двигатели семейства АЛ-31Ф;

б) разработка отдельного программного модуля, поставляемого с группой двигателей на внешнем носителе, предназначенного для прогноза оставшегося ресурса МРП на любом ПК или ноутбуке;

с) развёртывание диагностического центра, который в отношении МРП позволит разработчику, производителю и службам сервиса иметь информацию об оставшемся ресурсе определённой части или всего парка двигателей семейства АЛ-31Ф.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Полученные результаты исследования размерности вибросигнала при ухудшении технического состояния межроторного подшипника двигателей семейства АЛ-31Ф по имеющимся в бортовом устройстве регистрации самолёта данным предполагают переход к изучению и применению в составе вектора диагностических признаков совместно с Pstr других показателей, разработанных для анализа нелинейных динамических систем: закона распределения амплитуды вибросигнала, показателя Ляпунова, а также показателей, использующих алгоритмы цифровой обработки, оценивающих мультифрактальный спектр сигналов.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. **Тяпкин С.А.** Использование показателя размерности вибросигнала для диагностирования газотурбинных двигателей / **С.А. Тяпкин** // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – Вып. 5 (33). – С. 70-73. – doi10/25699/SSSB/2020/33/5/009.

2. **Тяпкин С.А.** Анализ существующих методов и возможные пути повышения эффективности системы диагностирования двигателей летательных аппаратов / **С.А. Тяпкин, Е.И. Мухин, Д.С. Коптев** // Известия Юго-Западного

государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2020. – Т. 10 (2). – С. 41-57.

3. **Тяпкин С.А.** Метод совместного применения показателя структуры вибросигнала и известных результатов идентификационных измерений в задачах превентивного обнаружения неисправностей авиационных двигателей / **С.А. Тяпкин**, Е.И. Мухин, Д.С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2020. – Т. 10 (2). – С. 58-68.

Публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science

4. **Tyapkin S.A.** The dimension indicator of the vibration signal for diagnosing gas turbine engines support bearings / **S.A. Tyapkin** // J. Phys. Conf. Ser. – 2021. – 1891012036. – doi10.1088/1742-6596/1891/1/012036.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Пат. №2688340 Российская Федерация, МПК G01M 15/14 (2006.01). Способ вибродиагностирования ГТД / **С.А. Тяпкин**; заявитель и правообладатель **Тяпкин С.А.** – №2015141518; заявл.30.09.2015; опубл.21.05.2019, Бюл. №15.

6. Свидетельство №2015660813 Российская Федерация. Программа контроля вибросостояния газотурбинного двигателя (ГТД) / **С.А. Тяпкин**; заявитель и правообладатель **Тяпкин С.А.** – 2015616585; заявл.13.07.2015; зарегистр.09.10.2015.

7. Свидетельство №2016613456 Российская Федерация. Программа сравнения сигналов по форме распределения мгновенных значений (2_ScaleAnalyzer) / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, **С.А. Тяпкин**; заявители и правообладатели Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю., **Тяпкин С.А.** – 2016611078; заявл.08.02.2016; зарегистр.28.03.2016.

8. Свидетельство №2016613523 Российская Федерация. Программа измерения и визуализации внутренней структуры диагностических сигналов (DistanceScanData) / Ю.Н. Кликушин, В.Ю. Кобенко, **С.А. Тяпкин**; заявители и правообладатели Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю., **Тяпкин С.А.** – 2016611102; заявл.08.02.2016; зарегистр.28.03.2016.

Статьи и материалы конференций

9. Метод синтеза моделей сигналов в физических исследованиях / А.А. Горшенков, Ю.Н. Кликушин, К.Т. Кошеков, **С.А. Тяпкин** // Вестник НТУУ. Сер. Приборостроение. – Киев: КПИ. – 2011. – Вып.42. – С. 101-112.

10. **Тяпкин С. А.** Отличительные особенности тренда исправных и неисправных авиационных и ракетных двигателей на основе корреляционной размерности вибросигнала / **С.А. Тяпкин** // Инфокоммуникационные и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции (17 апреля 2020

г.). – Курск: ЮЗГУ, 2020. – Ч. 2. – С. 33-38.

11. **Тяпкин С. А.** Основные направления диагностирования и прогнозирования технического состояния ответственных узлов и агрегатов воздушных судов на основе применения методов детерминированного хаоса / **С.А. Тяпкин**, Е.И. Мухин, Д.С. Коптев // Инфокоммуникационные и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции (17 апреля 2020 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2020. – Ч. 2. – С. 46-51.

12. **Тяпкин С. А.** Применение показателей нелинейной динамики для вибродиагностирования газотурбинных двигателей / **С.А. Тяпкин**, Е.И. Мухин, Д.С. Коптев // Инфокоммуникационные и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции (17 апреля 2020 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2020. – Ч. 2. – С. 51-55.