

На правах рукописи



ЗУБКО АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ
ОПОР ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05
«Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Звонарев Сергей Львович

Официальные оппоненты: Мельникова Нина Сергеевна, доктор технических наук, Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», заместитель главного конструктора

Ярославцев Сергей Владимирович, кандидат технических наук, АО «Турбонасос», ученый секретарь

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится «21» декабря 2020 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/d33/Dissertatsiya-Zubko-Aleksey-Igorevich.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Важной проблемой, связанной с подшипниковыми опорами ГТД является своевременная диагностика изменения их технического состояния. Именно подшипниковые опоры роторов являются критическим элементом в значительной степени определяющим ресурс всего двигателя в целом. Поскольку детали подшипников при работе испытывают высокие нагрузки, то деградационные процессы чаще всего носят быстротечный, лавинообразный характер. Такие отказы существенно влияют на безопасность полетов, а для военной авиации также снижают эффективность боевого применения летательного аппарата.

Наиболее остро стоят проблемы диагностики межроторных подшипниковых опор коаксиальных роторов ГТД. Сложность конструкции данных узлов и схем ГТД с их применением приводит к значительному уменьшению получаемой диагностической информации, что делает определение их технического состояния существующими методами практически невозможным. Отсутствие возможности своевременной диагностики, при разрушении межроторной подшипниковой опоры, приводит к сопутствующим повреждениям деталей и узлов и не ремонтпригодности ГТД. На некоторых типах двигателей доля таких отказов составляет несколько процентов от их общего количества.

В этой связи, является необходимым создание новых способов и методов диагностики, определяющих повреждения подшипниковых опор на ранних стадиях, не приводящих к существенному повреждению ГТД. Для повышения точности определения технического состояния и стадии повреждения подшипников необходимо объединение их в комплексную методику.

Степень разработанности темы. В развитие диагностики и вибродиагностики, внесли большой вклад А. Л. Горелик, который рассматривал распознавание технических состояний; И. А. Биргер рассматривал физические процессы роторной динамики и их влияние на вибрационные процессы. Соколова А. Г. и Балицкий Ф. Я. исследовали диагностику машин по изменению параметров быстропеременных процессов и связи параметров вибрационных, исследуемых процессов с изменением внутреннего и внешнего воздействиями на систему. А. В. Барков и Н. А. Баркова изучали процессы с помощью спектра огибающей вибрации, а именно, использовали диаграммы Боде и разработку методов ранней диагностики. А. Р. Ширман анализировал подходы к вибродиагностике подшипников качения. Вышеперечисленные ученые в процессе своих работ не рассматривали применение вибродиагностики для авиационных газотурбинных двигателей. Помимо этого, рядом авторов отмечалось высочайшая сложность диагностирования подшипниковых опор ГТД. А. Мушинска рассматривала орбиту перемещения геометрического центра вала, но при этом в процессе исследований использовала только датчики относительного виброперемещения, установка которых на роторы ГТД существенно затруднена. Б.Б. Коровин анализировал вибрационную диагностику роторных систем ГТД в процессе полета, но в своих работах

основывался на известных подходах, базирующихся на методах не всегда устойчиво работающих для газотурбинных двигателей. Поэтому, вопросы вибродиагностики подшипников опор ГТД в настоящее время не имеют законченного решения и требуют дальнейшего их развития и совершенствования.

Цель диссертационной работы - разработка комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей, учитывающей возникновение и развитие высокочастотных колебаний деталей подшипника и изменение динамических процессов роторных систем, являющихся следствием деградации их технического состояния.

Задачи исследования:

- разработка метода орбитального анализа вибрации роторов ГТД и алгоритмов диагностирования подшипниковых опор с его применением;
- разработка метода и алгоритмов диагностирования подшипниковых опор по изменениям фазы колебаний роторов ГТД;
- разработка метода и алгоритмов диагностики подшипниковых опор ГТД по анализу изменения амплитуды колебаний роторов;
- разработка метода и алгоритмов диагностики подшипниковых опор по спектральному анализу акустического давления, работающего ГТД;
- создание комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор ГТД и алгоритмов ее функционирования.

Научной новизной обладают следующие результаты.

- Создание и обоснование эффективности применения метода определения и визуализации динамических процессов многороторных систем, алгоритмов и матрицы состояния с целью последующей диагностики подшипниковых опор с использованием анализа вибрации ГТД, на относительно удалении от исследуемых узлов.
- Создание метода определения фаз колебаний роторов и алгоритмов диагностирования подшипниковых опор ГТД, без использования дополнительных измерений частот и фаз вращения роторов.
- Определение взаимосвязи между изменением амплитуды колебаний роторов ГТД и повреждениями подшипниковых опор с последующей выработкой диагностических признаков.
- Применение технического микрофона с целью диагностики подшипниковых опор ГТД и создание алгоритмов диагностики с использованием спектрального анализа звукового давления для оценки высокочастотной вибрации, генерируемой повреждениями подшипников.
- Создание структуры и алгоритмов функционирования комплексной методики диагностики подшипниковых опор ГТД учитывающий порядок и результаты применения разработанных методов для определения технического состояния и этапов повреждения подшипников.

Теоретическая значимость работы заключается в создании метода визуализации динамических процессов роторов ГТД в виде орбит вибрации и способов их анализа. В выявлении закономерностей динамических процессов, происходящих в роторных системах в процессе выхода из строя подшипниковых опор и появления высокочастотных колебаний. В создании методов, способов диагностики, выработки диагностических признаков и алгоритмов функционирования в составе комплексной системы, являющихся основой для создания инструментальных средств неразрушающего контроля (диагностики) нового поколения.

Практическая значимость результатов исследований заключается в создании комплексной методики, позволяющей оценить техническое состояние подшипниковых опор (в том числе межроторных) как в составе наземных, так и бортовых средств диагностики авиационных ГТД, что значительно повышает безопасность полетов и эксплуатации. Данная комплексная методика имеет высокий потенциал в целях исследования динамики роторных систем и целях контроля качества изготовления ГТД. Результаты работы используются в ООО НПП "ИДС Маяк", ОАО НИО ЦИТ «Петрокомета».

Методы исследования. В работе применялись преобразование Фурье, орбитальный анализ, метод построения ФЧХ и численное моделирование на основе использования метода конечных элементов (МКЭ). В качестве инструментов были использованы программные пакеты «Siemens Samcef Rotor», «Matlab», «Dewesoft».

Положения, выносимые на защиту.

- Метод орбитального анализа вибрации роторов ГТД и алгоритмы диагностирования подшипниковых опор с его применением;
- Метод и алгоритмы диагностирования подшипниковых опор по изменениям фазы колебаний роторов ГТД;
- Метод и алгоритмы диагностирования подшипниковых опор ГТД по анализу изменения амплитуды колебаний роторов;
- Метод и алгоритмы диагностики подшипниковых опор по спектральному анализу акустического давления, работающего ГТД;
- Комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор ГТД и алгоритмы ее функционирования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается подтверждением работоспособности разработанных методов, способов диагностики и диагностических признаков с экспериментальными и эксплуатационными данными, полученными в ПАО «ОДК-УМПО», ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова», ОАО «Красный Октябрь», ГНЦРФ «ЛИИ им. М.М. Громова», «929 ГЛИЦ ВВС им В. П. Чкалова».

Вклад автора в проведенное исследование

При выполнении диссертационной работы автор принимал непосредственное участие в получении следующих результатов:

- проведен критический анализ опубликованной информации о способах и методах диагностики подшипниковых опор газотурбинных двигателей и выполнена их сравнительная оценка;

- разработана диагностическая модель технического состояния подшипниковых опор ГТД, в процессе которой были рассмотрены основные виды отказов подшипников, создана математическая модель ГТД для исследования колебательных процессов и определены диагностические признаки повреждения подшипниковых опор;

- разработана комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей, в процессе которой были разработаны метод орбитального анализа вибрации роторов, метода диагностики подшипниковых опор по изменению фазы колебаний роторов, метод диагностики по анализу амплитуды колебаний роторов, метод диагностики по спектральному анализу акустического давления, работающего ГТД;

- выполнена верификация разработанной комплексной методики в процессе натурных испытаний двигателя АЛ-31ФП, ротора ТРДД и ВСУ-117.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты работы доложены на международных и всероссийских научно-технических конференциях [34-50]: «Авиадвигатель 21 века» 2015 [45]; IX международного форума «Интеллектуальная собственность XXI век» 2016. Уфа; «Гагаринские чтения» 2017 [46]; Международной военно-научной конференции «Актуальные проблемы вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере» 2017, Воронеж; IX международном форуме «Интеллектуальная собственность XXI век» 2016, Уфа; Всероссийской конференции молодых ученых механиков.YSM-2018, Сочи; «Академические Жуковские чтения» 2018 [44]; XLIX Всероссийский симпозиум «Механика и процессы управления» 2019, Миасс; VII Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» 2019, Воронеж.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 52 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 13 статей и получено 20 патентов РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 167 страниц текста, 96 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 189 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель исследования, приведены задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, а также выносимые на защиту положения.

В первой главе проведен анализ ГТД как объекта диагностирования и определены его особенности и специфика. Рассмотрены основные факторы, влияющие на ресурс подшипниковых опор ГТД. Сформулированы требования к

системе диагностики подшипников опор ГТД. Проведен анализ существующих методов вибрационной диагностики и контроля технического состояния подшипниковых опор ГТД. Определены основные группы методов, в которые входят трендовый анализ, анализ сигналов во временной области, анализ сигналов в частотной области и многомерный анализ параметров вибрации. Рассмотрены функциональные схемы методов, их основные достоинства и недостатки. Проведена сравнительная оценка рассмотренных методов по ряду критериев оценки технического состояния подшипников опор, которая показывает, что они становятся информативны и эффективны при существенных повреждениях подшипниковых опор, сопровождаемых прогрессирующим износом взаимодействующих рабочих поверхностей и ни один из них, полностью не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для реализации задач диагностирования подшипниковых опор (в том числе межроторных) необходима разработка новых более эффективных методов диагностики. Наиболее предпочтительными представляются направления разработок методов, реализующих преимущества анализа в высокочастотной области и многомерный анализ имеющий формат представления в виде траектории перемещения точки конца вектора вибрации.

Вторая глава посвящена разработке диагностической модели технического состояния подшипниковых опор ГТД.

Рассмотрены виды отказов подшипниковых опор роторов ГТД, более 90% которых является питтинг, что подтверждается исследованием состояния деталей исправных и поврежденных межроторных подшипниковых опор авиационных ГТД АЛ-31ФП, АЛ-41Ф-1С, АЛ-41Ф-1, АЛ-55И.

Сформирована физическая модель развития повреждения подшипниковых опор ГТД, в которой определены пять стадий повреждения. Проведен анализ процессов нагружения подшипниковых опор ГТД, из которого сделан вывод о том, что наиболее вероятной причиной повреждений деталей межроторных подшипниковых опор может являться нерасчетное нагружение, связанное с динамическим изменением нагрузок механических систем ГТД.

Разработана конечно-элементная модель роторной системы ГТД, позволяющая методом численного моделирования вибрационных процессов теоретически обосновать выводы, сделанные при обработке экспериментальных данных.

Разработана диагностическая модель неисправности подшипниковых опор (рисунок 1), учитывающая физическую модель развития повреждения, для чего было выполнено формирование требований к методам диагностики на каждой стадии развития повреждения деталей подшипниковых опор роторов ГТД и определение диагностических признаков, которые были взяты для формирования диагностической модели повреждения подшипниковых опор ГТД. Методы анализа ВЧ составляющих спектра вибрации используются как наиболее чувствительные на начальных этапах повреждений деталей подшипников. Увеличение шумовой составляющей в частотных диапазонах спектра вибрации 25 кГц и более свидетельствуют о появлении отдельных

трещин на взаимодействующих рабочих поверхностях деталей подшипников. По мере развития повреждений максимум ВЧ вибрации смещается в низкочастотный диапазон и наблюдается рост ее амплитуды. На последующих этапах деградации (3 и последующие) технического состояния подшипниковых опор становятся информативными признаки, связанные с изменением вектора вибрации, которые можно анализировать с использованием построения фазочастотных характеристик (ФЧХ). При этом следствием возникновения колебаний и интенсивных прецессионных движений ротора (роторов) из-за взаимодействия с повреждениями является увеличение дисперсии амплитуды роторных гармоник. Орбитальный анализ применяется для детального исследования динамического поведения системы и идентификации диагностических признаков развития повреждений деталей подшипников опор.

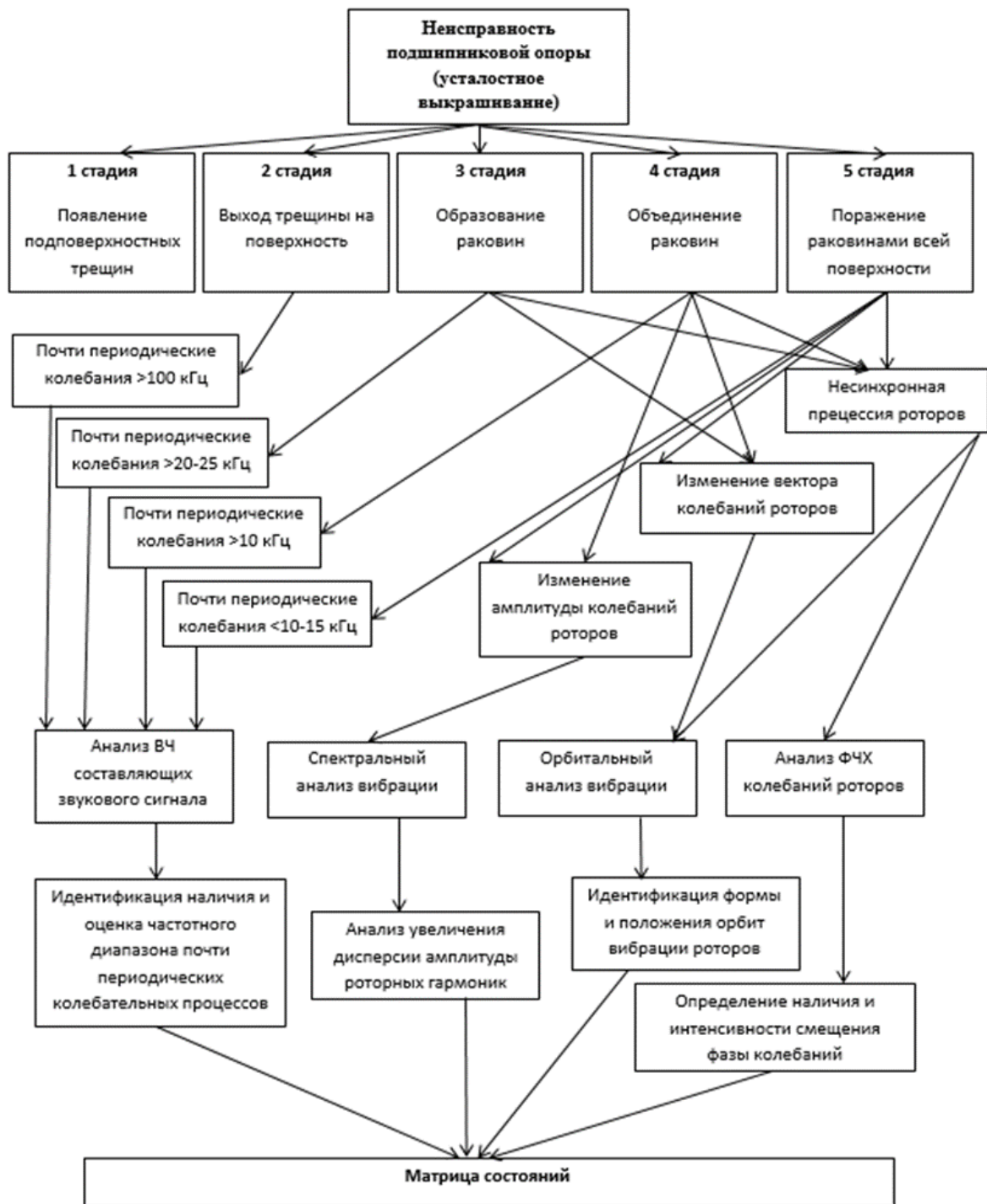


Рисунок 1 - Диагностическая модель неисправности подшипниковых опор ГТД

Третья глава посвящена разработке комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей. Для включения в комплексную методику разработаны методы диагностики технического состояния подшипниковых опор, исходя из требований к ним на каждом этапе развития повреждения. Разработан метод орбитального анализа вибрации, для которого разработаны алгоритмы измерения, представляющие из себя измерение вибрации корпуса ГТД вибродатчиками в двух взаимно перпендикулярных направлениях с пересечением осей измерений на строительной оси двигателя. Измеренные и

оцифрованные сигналы подвергаются математическому преобразованию, в котором выполняется интегрирование и многоуровневая фильтрация в частотном диапазоне до 1 кГц, с использованием фильтров с приемлемой характеристикой.

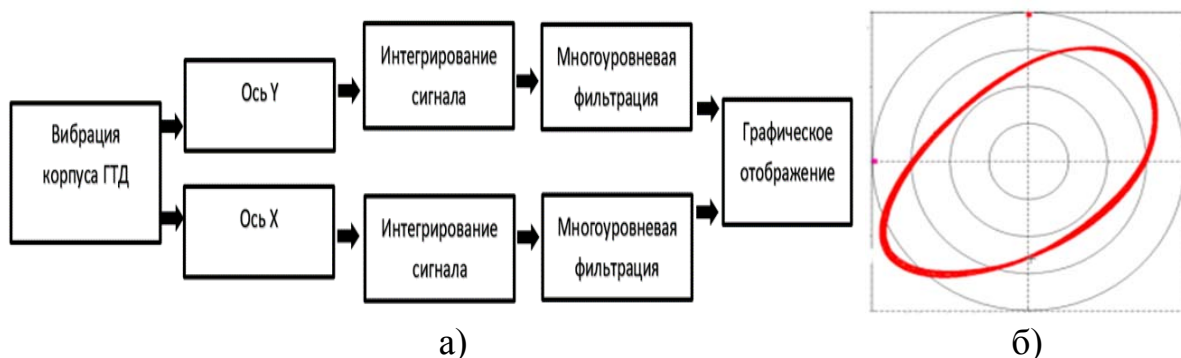


Рисунок 2 – а) структурная схема проведения орбитального анализа вибрации, б) орбита вибрации ротора высокого давления ГТД на режиме 80%

Метод позволяет одновременно анализировать орбиты двух и более роторов, что дает возможность комплексного определения параметров колебаний роторных систем и анализа взаимовлияния отдельных элементов, выполнять диагностику технического состояния подшипниковых опор ГТД.

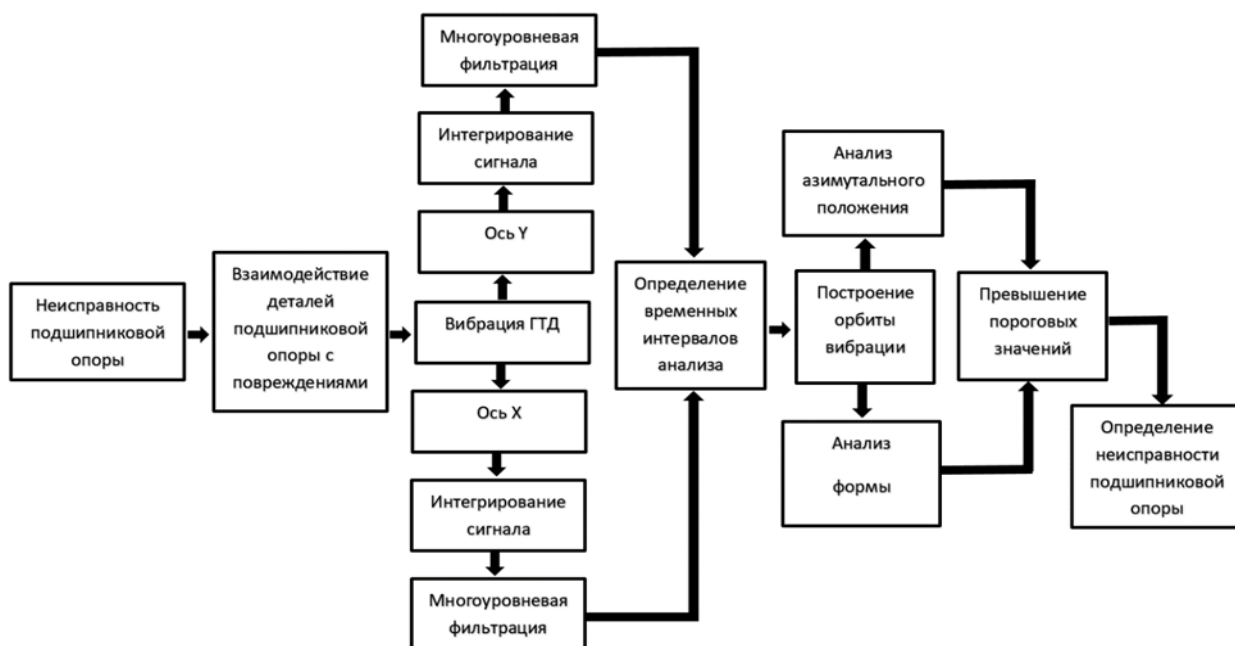


Рисунок 3 - Функциональная схема метода диагностики технического состояния подшипниковых опор с применением орбитального анализа вибрации

Данная схема включает измерение вибрации ГТД (рисунок 2, 3), определение временных интервалов анализа, для определения необходимого времени накопления орбит вибрации с целью устойчивого распознавания прецессионных движений роторов, анализ формы и азимутального положения орбит, (рисунок 4). Была разработана диагностическая матрица состояний роторных систем.

Определение технического состояние подшипниковых опор может выполняться в процессе автоматического распознавания или визуально, согласно диагностической матрице состояний.

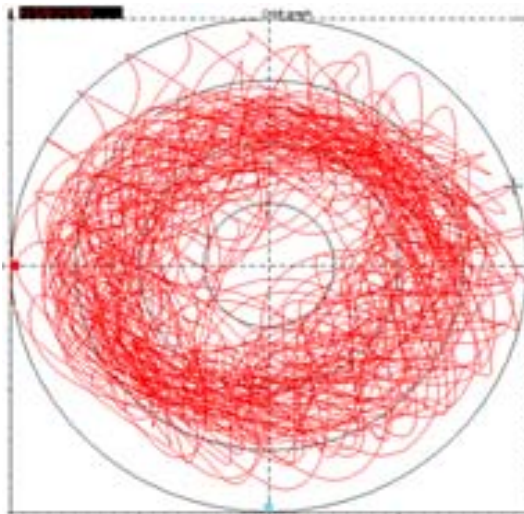
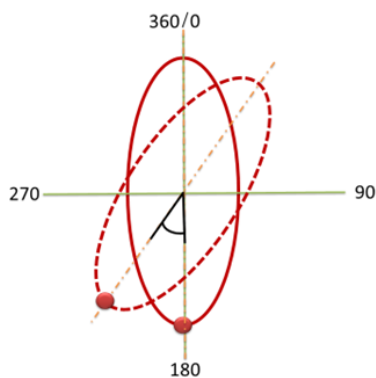
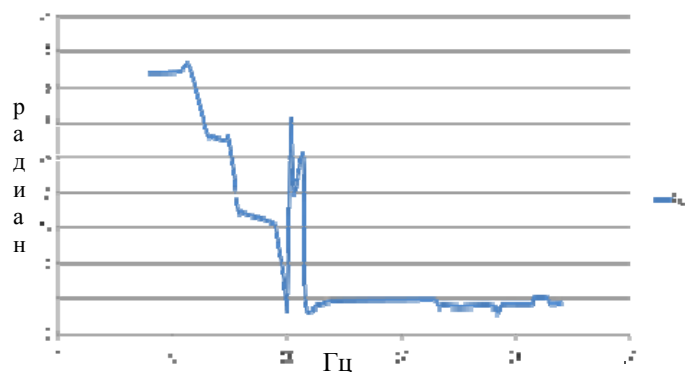


Рисунок 4- Орбита вибрации ротора при неисправности межроторной подшипниковой опоры

Также разработаны алгоритмы диагностирования подшипниковых опор по изменениям фазы колебаний роторов ГТД без установки дополнительных датчиков фазы вращения (рисунок 5 а). Путем измерения значения угла между главной осью эллипса и горизонтальной осью координат получено мгновенное значение фазы колебаний, и построена зависимость угла фазы от частоты вращения ротора (ФЧХ) (рисунок 5 б).



а)



б)

Рисунок 5- а) Определение угла фазы с помощью орбиты вибрации ротора
б) Построение ФЧХ ротора ГТД с использованием орбитального анализа вибрации

В результате возникновения интенсивных прецессионных движений ротора, фаза колебаний смещается на угол, равный смещению положения точки взаимодействия ротора. Данные движения ротора при неисправности подшипниковых опор носят постоянный характер, что отображается и может

быть идентифицировано на мгновенном значении фазы колебаний или при построении ФЧХ.

Проведена разработка метода диагностики подшипниковых опор ГТД по анализу амплитуды колебаний роторов и выработаны критерии их оценки. Необходимым условием является то, что колебания должны проявляться как минимум на нескольких режимах работы ГТД.

Разработан метод диагностики подшипниковых опор по спектральному анализу акустического давления, работающего ГТД. Подтверждена возможность диагностирования подшипниковых опор по высокочастотным механическим колебаниям и возможность использования технических микрофонов для диагностики авиационных ГТД.

Разработана структура и алгоритмы функционирования комплексной методики (рисунок 6).

Алгоритм функционирования комплексной методики реализуется поэтапно. На первом этапе выполняется одновременный поиск диагностических признаков работающего ГТД, в процессе которого выполняется:

- идентификация ВЧ колебаний в спектре акустического давления, установленным на корпус ГТД техническим микрофоном и их сравнение с пороговыми значениями;

- анализ развитых прецессионных движений роторов путем определения и сравнения со значениями матрицы состояния, форм и положения орбит, при этом, для срабатывания необходима идентификация на всех режимах работы ГТД;

- определение фаз колебаний роторов с помощью орбитального анализа вибрации, с целью идентификации постоянного изменения фазы колебаний на всех режимах работы ГТД;

- анализ дисперсии амплитуд роторных частот, в процессе которой выполняется идентификация колебаний амплитуд, выше пороговых значений.

На втором этапе выполняется анализ выявленных диагностических признаков (срабатывание метода диагностирования):

- при отсутствии признаков неисправности подшипниковых опор двигатель допускается к дальнейшей эксплуатации;

- при выявлении диагностических признаков, не превышающих пороговые значения двигатель, допускается к дальнейшей эксплуатации с периодическим контролем;

- при выявлении диагностических признаков одного метода выполняется дополнительная проверка с помощью диагностического приспособления ДП-03 в процессе холодной прокрутки роторов ГТД. В результате обнаружения диагностических признаков, выше пороговых значений, диагноз подтверждается, и двигатель отстраняется от эксплуатации. При отсутствии

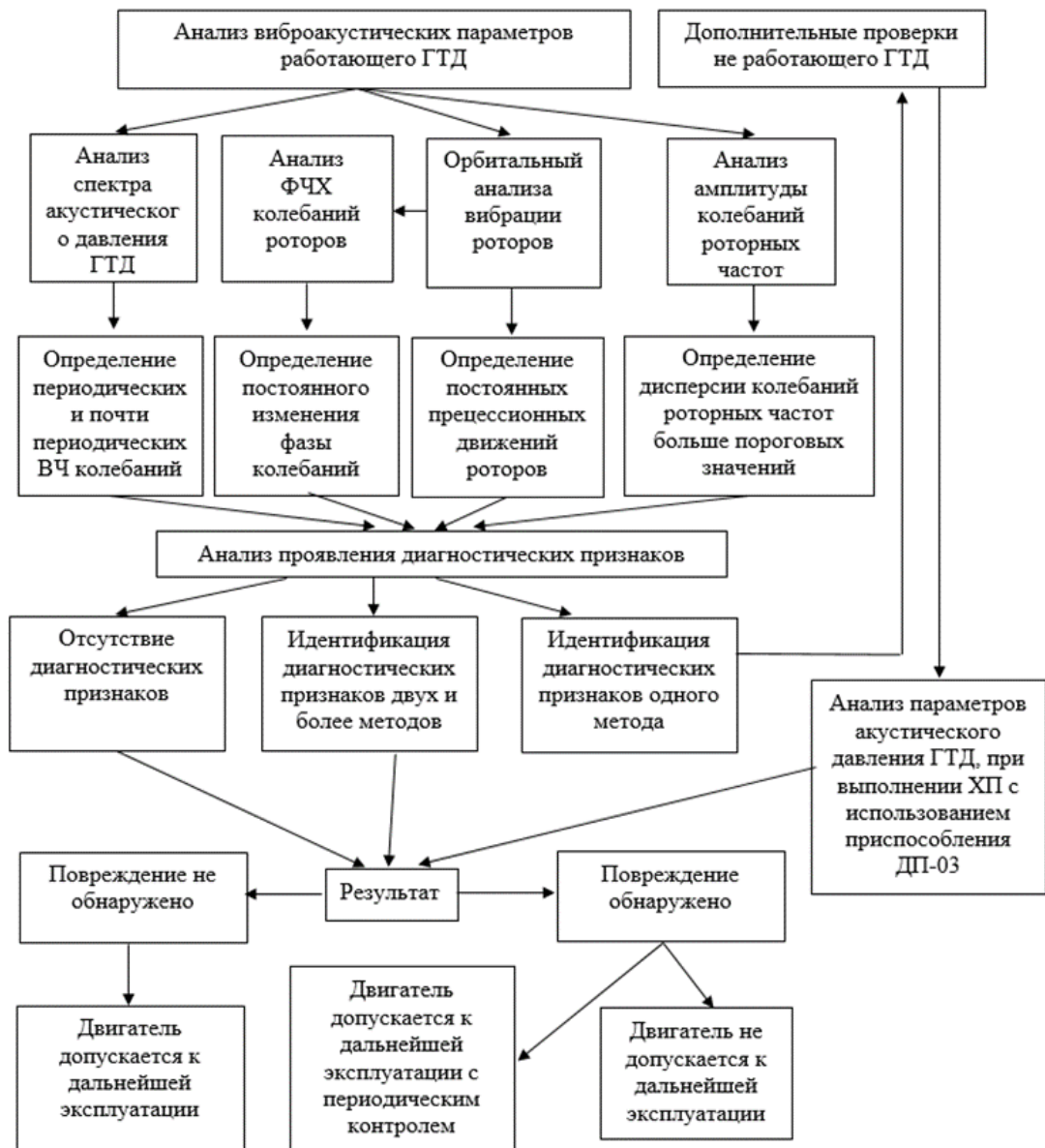


Рисунок 6 - Функциональная схема комплексной методики виброакустической диагностики подшипниковых опор ГТД


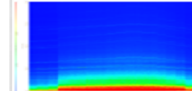

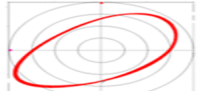
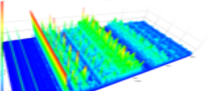

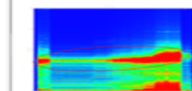

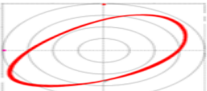
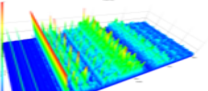
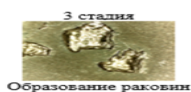
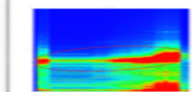

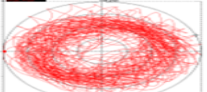
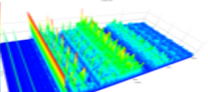

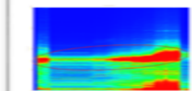

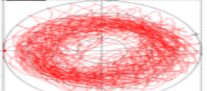
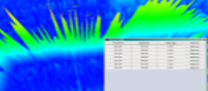

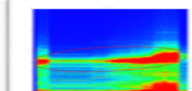

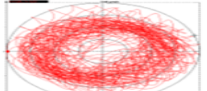
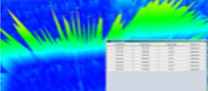
диагностических признаков, в процессе дополнительной проверки, двигатель допускается к дальнейшей эксплуатации с периодическим контролем;

- выявление двух и более диагностических признаков свидетельствует о повреждении подшипниковой опоры, в результате двигатель отстраняется от эксплуатации.

В таблице 1 представлены стадии повреждения подшипниковой опоры и примеры отображения используемых методов диагностики на каждой из них.

В результате проведенных работ была разработана комплексная методика виброакустической диагностики подшипниковых опор ГТД, обладающая высокой достоверностью в независимости от проявления диагностических признаков и интенсивности деградиционных процессов и защитой от ложных срабатываний путем подтверждения диагноза несколькими различными методами диагностирования.

Таблица 1- Отображения результатов, полученных при использовании разработанных методов диагностики на различных стадиях повреждений подшипниковых опор

Стадии повреждения подшипниковой опоры ГТД	Анализ спектра акустического давления ГТД	Анализ ФЧХ колебаний роторов	Орбитальный анализ вибрации роторов	Анализ амплитуды колебаний роторных частот
1 стадия Появление подповерхностных трещин 				
2 стадия Выход трещины на поверхность 				
3 стадия Образование раковин 				
4 стадия Объединение раковин 				
5 стадия Поражение раковинами всей поверхности 				

Четвертая глава посвящена использованию комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей.

На первом этапе верификации комплексной методики при проведении специальных испытаний подтверждена работоспособность предложенных методов диагностики и алгоритмов функционирования для наиболее сложного случая в плане диагностирования, которым является межроторный подшипник двигателя АЛ-31ФП.

На втором этапе рассматривалось использование комплексной методики виброакустической диагностики для определения динамических характеристик ротора ТРДД установленного на вакуумном разгонно-балансировочном стенде HL-4 Schenck. Выполнялась верификация метода определения фазы колебаний.

На третьем этапе проводилась диагностика и определение причин выходов из строя подшипниковой опоры ВСУ-117. Проведение диагностических процедур с использованием разработанной методики позволило обосновать необходимость проведения дополнительных расчетных исследований агрегата, в результате чего были внесены конструктивные изменения, что позволило решить проблему выхода из строя его подшипниковой опоры.

На четвертом этапе выполнялась реализация элементов комплексной методики в модуле контроля и диагностирования роторных систем, интегрированного в ИДС «АРМ ДК-30(СД) серии М» двигателей АЛ-31ФП и АЛ-41Ф-1С. В результате использования элементов комплексной методики в качестве основных алгоритмов, была создана автоматизированная система, позволяющая выполнить диагностирование технического состояния подшипниковых опор в условиях эксплуатации (непосредственно на летательном аппарате, базирующемся на аэродроме. Также была выполнена

реализация элементов комплексной методики в аппаратно-программном комплексе контроля и оценки технического состояния ГТД АЗ-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена актуальная научно-техническая задача создания способов и методов диагностики, дающих возможность устойчивого определения технического состояния межроторных подшипников и подшипниковых опор ГТД в целом, на различных стадиях повреждений. Увеличение эффективности диагностирования достигается путем объединения отдельных методов в комплексную систему.

Основные выводы по работе сформулированы в следующем виде:

1. Разработан метод орбитального анализа вибрации роторов ГТД и алгоритмы диагностирования подшипниковых опор с его применением. Метод позволяет определить примерное положение ротора в подшипниковых опорах ГТД, что позволяет выполнять задачи диагностики и исследования динамических процессов роторных систем. С целью выполнения задач определения технического состояния определены диагностические признаки выхода из строя подшипниковых опор, в процессе чего была сформирована диагностическая матрица состояния и решены задачи автоматизации.

2. Разработан метод и алгоритмы диагностирования подшипниковых опор по изменениям фазы колебаний роторов ГТД, в процессе чего был проведен анализ возможности измерения фаз колебаний роторов, в результате этого был разработан метод их определения с помощью орбитального анализа вибрации и алгоритмы диагностирования, включающие определение изменения на всех режимах фаз колебаний роторов.

3. Разработан метод и алгоритмы диагностики подшипниковых опор ГТД по анализу амплитуды колебаний роторов, в процессе чего проведены исследования колебаний амплитуд роторных частот исправных и не исправных подшипниковых опор ГТД и экспериментальных подшипников установленных на стендах испытаний подшипников, результатом которых стало определение диагностических признаков по дисперсии амплитуд роторных частот.

4. Разработан метод и алгоритмы диагностики подшипниковых опор по спектральному анализу акустического давления, работающего ГТД. В процессе разработки определена возможность использования технических микрофонов для задач диагностики ГТД, разработано диагностическое приспособление, устанавливаемое в ГВТ и алгоритмы определения технического состояния подшипниковых опор, учитывающие определение высокочастотных колебаний в частотном диапазоне 3-25 кГц.

5. С использованием разработанных в диссертации методов создана методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор ГТД и алгоритмы ее функционирования. В процессе создания была разработана структура комплексной методики, включающая разработанные методы и способы, функциональная схема, выполняющая идентификацию диагностических признаков с целью определения повреждения подшипниковых опор. В результате идентификации двух и более

диагностических признаков двигатель отстраняется от эксплуатации. При идентификации одного признака, для исключения ложных срабатываний выполняется дополнительная проверка с помощью разработанного диагностического приспособления.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Аксенов С. П., Валюхов С. Г., Зубко А. И., Нецвет В. А. Исследование путей снижения виброперегрузок многороторных систем ГТД // Насосы. Турбины. Системы. 2017. №4. (25). С. 59-63.

2. Аксенов С. П., Звонарев С. Л., Зубко А. И., Нецвет В. А. Особенности двухконтурного газотурбинного двигателя как объекта диагностирования // Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 1 (26). С. 16-24.

3. Аксенов С. П., Нецвет В. А., Зубко А. И., Уваров В. Г. Исследование механизма дестабилизации динамических характеристик ротора ГТД вследствие нарушения плотности стыков ответственных резьбовых соединений с разработкой мероприятий по повышению качества готовой продукции // Насосы. Турбины. Системы. 2019. № 3 (32). С. 55-64.

4. Герман Г. К., Зубко А. И., Калюжный О. Н. Проблемы диагностики отказов подшипников качения двухконтурных ГТД и пути их решения // Двигатель. 2013. №1 (85). С. 38–39.

5. Звонарев С. Л., Зубко А. И. О возможных причинах отказов подшипников качения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №3. Часть 3. С. 16-22.

6. Зубко А. И. Перспективный комплекс виброакустической диагностики подшипников опор авиационных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 1. С. 47 -55.

7. Зубко А. И., Аксенов С. П., Звонарев С. Л., Нецвет В. А. Создание диагностической модели при решении задачи применения вибродиагностического контроля динамики двухроторного ГТД // Турбины. Насосы. Системы. 2018. №3 (28). С. 35-43.

8. Зубко А. И., Аксенов С. П., Звонарев С. Л., Нецвет В. А., Зубко И. О. Опыт применения экспериментального модального анализа для контроля качества изготовления и сборки роторов ГТД // Насосы. Турбины. Системы. 2020. № 1 (34). С. 21-31.

9. Зубко А. И., Донцов С. Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. №74. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=49296> (дата обращения 03.09.2020).

10. Критский В. Ю., Зубко А. И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового

поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. №3 (87). С. 24-26.

11. Нецвет В. А., Зубко А. И. Отстройка роторов газотурбинных двигателей от резонансных частот путем регулирования жесткостных характеристик ротора // Насосы. Турбины. Системы. 2020. № 1 (34). С. 14-20.

12. Семенова А. С., Зубко А. И. Исследование технического состояния межроторного подшипника на вибродиагностическом стенде СП-180М после прохождения ресурсных испытаний // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 126-138.

13. Mekhrengin M., Miroshnichenko G., Chistiakov A., Bolotov D., Ashirov A., Zubko A., Meshkovskiy I. Combination of soot pyrometry and C_2^* emission spectroscopy for temperature measurement during combustion of hydrocarbons // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2020. Vol. 166. Article 108242.

Патенты

14 Пат. 2537669 Российская Федерация, МПК G01M. Способ диагностики технического состояния межроторного подшипника двухвального газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2014102861; заявл. 29.01.2014; опубл.10.01.2015, Бюл. № 1.

15 Пат. 2551447 Российская Федерация, МПК G01M. Способ вибрационной диагностики технического состояния подшипниковой опоры ротора двухвального газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2014107283/06; заявл. 27.02.2014; опубл.27.05.2015, Бюл. № 15.

16 Пат. 2552389 Российская Федерация, МПК G01M. Устройство для диагностики технического состояния межроторного подшипника двухвального газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко А. И., Зубко И. О., Костикова Е. В., Отрох Д. В.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2014102862/28; заявл. 29.01.2014; опубл.10.06.2015, Бюл. № 16.

17 Пат. 2658118 Российская Федерация, МПК G01M. Способ диагностики подшипниковых опор газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко А. И., Зубко И. О.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2017124964; заявл.13.07.2017; опубл.19.06.2018., Бюл. № 17.

18 Пат. 2575243 Российская Федерация, МПК G01M. Способ виброакустической диагностики технического состояния подшипников в составе газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2014139569/06; заявл. 01.10.2014; опубл.20.02.2016, Бюл. № 5.

19 Пат. 2729561 Российская Федерация, МПК F02МС. Опора ротора высокого давления газотурбинного двигателя / Зубко А. И., Лукин В. А., заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - №2019127866; заявл. 04.09.2019; опубл. 07.08.2020, Бюл. № 22.

20 Пат. 2608512 Российская Федерация, МПК F01C, F16C. Межроторная опора газотурбинного двигателя / Зубко А. И., Лукин В. А.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2015112581; заявл. 07.04.2015; опубл.19.01.2017, Бюл. № 2.

21 Пат. 2609887 Российская Федерация, МПК F02C. Межроторная опора газотурбинного двигателя / Зубко А. И., Кикоть Н. В., Лукин В. А., Щербаков В. В.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2014114187; заявл. 11.04.2014; опубл. 06.02.2017, Бюл. № 4.

22 Пат. 2614908 Российская Федерация, МПК G01M. Способ вибрационной диагностики подшипниковых опор в составе газотурбинных двигателей по изменению размаха амплитуды роторных частот/ Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2015155644; заявл. 24.12.2015; опубл.30.03. 2017, Бюл. № 10.

23 Пат. 2614463 Российская Федерация, МПК F16C. Многосегментный радиальный подшипник скольжения / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2016107213; заявл. 29.02.2016; опубл.28.03.2017, Бюл. № 10.

24 Пат. 2613047 Российская Федерация, МПК G01M. Способ вибрационной диагностики подшипниковых опор в составе газотурбинных двигателей с применением технического микрофона / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2015150544; заявл. 25.11.2015; опубл.15.03. 2017, Бюл. № 8.

25 Пат. 2623602 Российская Федерация, МПК G01M. Способ определения собственных частот и форм колебаний деталей сложной формы/ Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2016108705; заявл. 11.03.201; опубл.28.06.2017, Бюл. № 19.

26 Пат. 2627750 Российская Федерация, МПК G01M. Способ определения динамического дисбаланса ротора авиационного газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2016132676; заявл. 09.08.2016; опубл. 11.08.2017, Бюл. № 23.

27 Пат. 2668358 Российская Федерация, МПК G01H. Способ обнаружения резонансных колебаний ротора газотурбинного двигателя / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2017139961; заявл. 17.11.2017; опубл.28.09.2018, Бюл. № 28.

28 Пат. 2642963 Российская Федерация, МПК G01M. Устройство для измерения акустического сигнала от деталей турбомшины / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2017112768; заявл. 13.04.2017; опубл.29.01.2018, Бюл. № 4.

29 Пат. 2651406 Российская Федерация, МПК F16C. Комбинированный подшипник / Герман Г. К., Зубко И. О., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - №2017106591; заявл. 28.02.2017; опубл.19.04. 2018, Бюл. № 11.

30 Пат. 2680024 Российская Федерация, МПК F23N. Способ определения технического состояния датчиков пламени ионизационных / Зубко А. И., Зубко

И. О., Герман Г. К., Ярмаш А. Д.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2018109393; заявл. 16.03.2018; опубл.14.02.2019, Бюл. № 5.

31 Пат. 2682561 Российская Федерация, МПК G01M. Способ определения технического состояния токосъемников / Зубко А. И., Зубко И. О., Мухин А. Н., Мухина С. Д.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - № 2018105725; заявл. 15.02.2018; опубл.19.03.19, Бюл. № 8.

32 Пат. 2705699 Российская Федерация, МПК F02C. Сигнализатор температуры и магнитных продуктов износа в системе смазки / Давыдова Л. Д., Замышляев А. Н., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель ПАО ОДК - УМПО (RU). - №2018138739; заявл. 02.11.2018; опубл.11.11.2019, Бюл. № 32.

33 Пат. 2730758 Российская Федерация, МПК F01D. Способ управления жесткостью гидродинамических демпферов опор турбомашин / Аксенов С. П., Нецвет В. А., Грасько Т. В., Хакимов Т. М., Семенова А. С., Зубко А. И.; заявитель и патентообладатель Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж) МО РФ (RU). - №2019116041; заявл. 24.05.2019; опубл.25.08.20, Бюл. № 24.

Другие публикации

34 Алексеев А. А., Нецвет В. А., Зубко А. И. Особенности устранения неуравновешенности докритических и закритических роторов // Академические Жуковские чтения: сб. научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции (14–15 ноября 2018). – Воронеж: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018, Т. 2. - С. 136 -139 (253 с.)

35 Алексушин С. В., Ашмарин В. В., Букреев А.Н., Громова Н. Ю., Елькин А. В., Зубко А. И., Марчуков Е. Ю., Назаренко Ю. Б и др. Итоги науки. / Выпуск 41. Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. - М.: РАН, 2019. – 233 с.

36 Губанков А. С., Зубко А. И., Зуев А. В., Кузьмин И. А., Кульков А. А., и др. Итоги науки / Выпуск 20. Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам новых технологий. М.: РАН, 2015. – 176 с.

37 Звонарев С. Л., Зубко А. И. Диагностика состояния подшипниковых опор роторов газотурбинных двигателей (ГТД) по изменению степени подогрева проходящего через них масла // Актуальные вопросы технических и математических наук: сб. труд. I Международной научно-практической конференции. - Киев: Изд-во Логос, 2013. - С. 113 – 120.

38 Зубко А. И. Оценка возможности использования субгармонических колебаний в качестве диагностического признака ухудшения технического состояния опоры вала газотурбинного двигателя (ГТД) // Наука вчера, сегодня, завтра: материалы II Международной заочной научно-практической конференции. — Новосибирск: Изд-во СибАК, 2013. – С. 35-41.

39 Зубко А. И. Вибрационная диагностика технического состояния опоры ротора двухвального газотурбинного двигателя с помощью орбитального анализа. // Научно-технический Конгресс по двигателестроению (НТДК 2014):

сб. тезисов Международного форума двигателестроения. - М.: Двигатель, 2014. Ч.2. 2014. - С. 57- 59.

40 Зубко А. И. Анализ причин повреждений и диагностика опоры высокого давления двухконтурного ГТД // Наука и технологии: Материалы XII Всероссийской конференции по проблемам новых технологий, посвященной 70-летию Победы. - М.: РАН, 2015. - С. 57- 64.

41 Зубко А. И. Анализ влияния места расположения датчиков на проведение диагностики роторных систем газотурбинных двигателей // Новые технологии и решения в газотурбостроении: Материалы Всероссийской научно технической конференции молодых ученых и специалистов. - М.: ЦИАМ, 2015. - С. 309 – 311.

42 Зубко А. И. Метод вибрационной диагностики подшипниковых опор сложных роторных систем газотурбинных двигателей на основе анализа высокочастотных составляющих спектра вибраций // Академические Жуковские чтения: сб. научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции (25–27 ноября 2014). – Воронеж Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014, Ч.5 - С. 256-264. (480 с.)

43 Зубко А. И. Анализ горения в горелке ГТД методами вибродиагностики //Механика деформируемого твердого тела. Механика жидкости и газа. НИИ механики МГУ. Всероссийская конференция молодых ученых механиков YSM-2018.Тезисы докладов (4 – 14 сентября 2018. Сочи Буревестник МГУ). –М.: Изд-во Московского университета, 2018. -172 с.,- URL:<http://www.imec.msu.ru/>". С. 80

44 Зубко А. И. Построение фазово-частотных характеристик колебаний роторов с применением орбитального анализа вибрации // Академические Жуковские чтения: сб. научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции (14–15 ноября 2018). – Воронеж Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018, Том 2, - С. 195-197. (253 с.)

45 Зубко А. И., Герман Г. К. Исследование комплексной методики вибродиагностики для определения технического состояния роторных систем ГТД // Авиадвигатели 21 века: сб. тезисов докладов всероссийской научно-технической конференции. - М.: ЦИАМ, 2015. - С. 63-69.

46 Зубко А. И., Звонарев С. Л. Исследование возможности использования метода орбитального анализа вибрации для определения резонанса роторных систем // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 531-532. (1480с.)

47 Зубко А. И., Назаренко Ю. Б, Егоров Е. В. Анализ критических частот роторов методом расчетного и экспериментального расчетного модального анализа / Механика и процессы управления: сб. материалов XLIX Всероссийского симпозиума. - М.: РАН, 2019. – С. 60 -74. (119 с.)

48 Зубко А. И., Отрох Д. В., Тищенко Ю. Л. Определение возможности использования триботехнических методов для прогнозирования технического

состояния авиационных двигателей // Перспективы развития авиационных комплексов государственной авиации и их силовых установок: сб. научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции (22–23 ноября 2017), – Воронеж Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018, С. 195-197. (516 с.)

49 Зубко А. И. Семенова А. С., Исследование причин повреждения экспериментального модельного керамического подшипника скольжения с использованием метода орбитального анализа // - Сборник статей по материалам Всероссийской ежегодной научной конференции: Актуальные проблемы вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере, Сборник статей. – Воронеж Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015, Ч. V, - С. 935 – 937.

50 Назаренко Ю. Б., Зубко А. И., Даречкин А. М. Влияние ослабления стержневых элементов на критические частоты вращения роторов // Сборник трудов XXXIX Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. - М.: РАН, 2019. т.1. – С. 100-108.

51 Охтилев М. Ю., Хищенко В. И., Коромысличенко В. Н., Ключарёв А. А. Зубко А.И. Мониторинг прецессии роторных систем газотурбинных двигателей и оценка состояния межроторных подшипников // Проблемы региональной энергетики. 2018. №1(36). URL: https://journal.ie.asm.md/assets/files/02_01_36_2018.pdf (дата обращения 03.09.2020).

52 Zubko A. Kritsky V. Implementation of Higt Strength Composite Ceramic Materials for Producing Tribotechnical Parts of Gas Turbine Engeines as Constructional Nano-Structured Materials., – URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0746_paper.pdf (дата обращения 03.09.2020).