



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

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

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

«УТВЕРЖДАЮ»



Первый проректор – проректор
по научно-исследовательской работе

16.11.2020г.
Прокофьев А.Б.

№ _____
На № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

на диссертационную работу *Зубко Алексея Игоревича*

«Комплексная методика виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей»,

представленную на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационной работы

Подшипники опор роторов относятся к одним из самых высоконагруженных элементов конструкции, во многом определяющих работоспособность, надёжность и долговечность газотурбинных двигателей в целом. В настоящее время на некоторых двигателях имеют место единичные проявления отказов подшипников опор (в частности межроторных). Последствия отказа приводят к существенным повреждениям двигателя и невозможности его восстановления. Конструктивные особенности газотурбинных двигателей вызывают сложности определения технического состояния подшипников опор роторов, что приводит к необходимости комплексного подхода в выборе методов диагностирования. Поэтому диагностика подшипников опор ГТД актуальна не только сегодня и в будущем, в связи с повышением их нагруженности в перспективных двигателях, её значение будет только увеличиваться. Всё это делает работу, направ-

Отдел документационного
взаимодействия МАИ

Их. № _____
«04» _____ 2020г.

И.А.Анф /

ленную на разработку комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей актуальной.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые в отечественной практике создан метод определения и визуализации динамических процессов многороторных систем и обоснована эффективность его применения с целью последующей диагностики подшипниковых опор с использованием анализа вибрации ГТД, на относительно удалении от исследуемых узлов.

2. Создан метод определения фаз колебаний роторов и алгоритмов диагностирования подшипниковых опор ГТД, без использования дополнительных измерений частот и фаз вращения роторов.

3. Определена взаимосвязь между изменением амплитуды колебаний роторов ГТД и повреждениями подшипниковых опор с последующей выработкой диагностических признаков.

4. Применен технический микрофон с целью диагностики подшипниковых опор ГТД и созданы алгоритмы диагностики с использованием спектрального анализа звукового давления для оценки высокочастотной вибрации, генерируемой повреждениями подшипников.

5. Разработана диагностическая модель повреждения роликового подшипника качения с выделением условных этапов его деградации.

6. Создана структура и алгоритмы функционирования комплексной методики диагностики подшипниковых опор ГТД учитывающий порядок и результаты применения разработанных методов для определения технического состояния и этапов повреждения подшипников.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что:

1. Создана комплексная методика, позволяющая оценить техническое состояние подшипниковых опор (в том числе и межроторных) как в составе наземных, так и бортовых средств диагностики авиационных ГТД.

2. Использование разработанной комплексной методики значительно повышает безопасность полётов и эксплуатации авиационной техники.

3. Данная комплексная методика имеет высокий потенциал для реализации при проведении исследования динамики роторных систем и целях контроля качества изготовления ГТД.

Общие сведения о диссертационной работе

Диссертационная работа Зубко А.И. состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 167 страниц 96 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 189 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведены: постановка задач, краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов и представлены разработанные методы исследования.

В первой главе проведен анализ ГТД как объекта диагностирования и определены его особенности и специфика диагностирования. 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. Рассмотрены функциональные схемы методов, основные достоинства и недостатки. Проведена сравнительная оценка рассмотренных методов по ряду критериев оценки технического состояния подшипников опор, которая показывает, что существующие методы 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.

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

Разработана диагностическая модель неисправности подшипниковых опор, 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.

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. Создан 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. С целью автоматического распознавания прецессионных движений роторов, влияющих на изменение положения ротора в подшипниковом зазоре, рассмотрены вопросы возможности автоматизации проведения орбитального анализа. В результате установлено, что определение технического состояние подшипниковых опор может выполняться в процессе автоматического распознавания или визуально, согласно диагностической матрице состояний. Также проведена разработка алгоритмов диагностирования подшипниковых опор по изменениям фазы колебаний роторов ГТД. Разработан метод диагностики подшипниковых опор ГТД по анализу амплитуды колебаний роторов. Разработан метод диагностики подшипниковых опор по спектральному анализу акустического давления работающего ГТД. В результате была подтверждена возможность диагностирования подшипниковых опор по высокочастотным механическим колебаниям и возможность использования технических микрофонов для диагностики авиационных ГТД.

В четвертой главе приведены примеры использования комплексной методики виброакустической диагностики технического состояния подшипниковых опор газотурбинных двигателей и проанализированы результаты выполненных экспериментальных исследований.

В заключении обобщаются результаты и делаются выводы об эффективности проведенных работ.

Рекомендации по использованию материалов диссертации

Результаты диссертационной работы имеют практическую ценность для предприятий и организаций, занимающихся разработкой и эксплуатацией авиационных и наземных газотурбинных двигателей таких, как ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ММП имени В.В. Чернышева», АО «ОДК-Климов», АО «ОДК-Газовые турбины», АО «ОДК-Авиадвигатель», АО «ОДК-Пермские моторы», ПАО «Кузнецов», АО «218 AP3», АО «AAP3» и других. Разработанные методы определения технического состояния подшипников опор роторов ГТД могут применяться и для исследований условий их работоспособности при рассмотрении вопросов динамики роторных систем. Разработанные методы орбитального анализа и изменения фазы вибрации могут быть реализованы для повсеместно-

го использования при контроле качества изготовления и сборки, а также изменения технического состояния ГТД в процессе эксплуатации.

Рассмотренные комплексные подходы содержат в себе основу для формирования основных направлений дальнейших работ по данной тематике.

Замечания по содержанию диссертации

Несмотря на достаточно высокий уровень, диссертационная работа не лишена недостатков, к которым можно отнести следующие:

1. Не рассмотрены методы долгосрочного прогнозирования работоспособности подшипников роторных систем применительно к этапу их эксплуатации.

2. Не полностью исследованы явления проскальзывания в подшипниках.

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы и не влияют на ее основные результаты.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней

Диссертация Зубко А.И. является научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов и решений технических задач по диагностике технического состояния опор роторов ГТД. Поставленная цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации автора в полном объеме отражают содержание, выводы и результаты работы.

Диссертация соответствует всем критериям, приведенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор Зубко Алексей Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

При проведении дальнейших исследований рекомендуется рассмотреть вопросы возможности разработки методов долгосрочного прогнозирования работоспособности подшипников роторных систем ГТД на основе результатов полученных при активном использовании предложенной комплексной методики.

Отзыв на диссертационную работу Зубко А.И. обсужден и одобрен на заседании кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. Присутствовало 19 человек. Результаты голосования: «за» - 19, «против» - нет, «воздержалось» - нет. Протокол №3 от 21.10.2020.

Заведующий кафедрой конструкции
и проектирования двигателей
летательных аппаратов, д.т.н., профессор



С.В. Фалалеев

Фалалеев Сергей Викторович, доктор технических наук, специальность 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», профессор, заведующий кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Тел.: +7(845) 3358767, kipdla@ssau.ru, www.ssau.ru

С отзывом ведущей организации ознакомлен  / Зубко А.И.
04.12.2020