

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу Сундукова Александра Евгеньевича
на тему «РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ГТД»,**

**представленной на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов**

Актуальность темы диссертации

В настоящее время все большее внимание уделяется организации эксплуатации сложных технических изделий «по состоянию». В связи с этим требуется развитие методов диагностики технического состояния изделий в эксплуатации. Как известно, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) являются одними из самых сложных изделий машиностроения. Это объясняется тем, что ГТД содержит такие сложные и динамически нагруженные узлы, как компрессор, турбина, камера сгорания и редуктор.

Редукторы применяются в составе турбовинтовых (ТВД), турбовальных (ТВЛД) и двухконтурных двигателей (ТРДД) с большой степенью двухконтурности. До сих пор успешно используется и доказывает свою эффективность схема ТВД НК-12 с соосным воздушным винтом и с планетарным редуктором. Так же эффективной оказалась схема ТВВД Д-27 с соосным винтовентилятором. При испытаниях свою эффективность показал двигатель НК-93 с закапотированным соосным винтовентилятором.

В таких двигателях одним из самых нагруженных узлов является планетарный редуктор привода воздушных винтов и вентиляторов. Автор правильно отмечает, что основными дефектами редукторов являются износ боковых поверхностей зубьев и увеличение бокового зазора в зубчатом зацеплении. Наиболее интенсивно эти дефекты развиваются в паре «солнечная шестерня - сателлиты», что приводит к генерации вибрации, возбуждающей резонансные колебания элементов конструкции двигателей. В работе отмечено, что при создании и доводке таких двигателей, как НК-12, АЛ-31Ф, Д-27 наблюдались процессы разрушения элементов двигателя. Модернизация дви-

гателя НК-12МПМ для использования с воздушным винтом большей тяги привела к поломке рабочей лопатки 7-й ступени компрессора уже после первого этапа лётных испытаний. При этом частота формы колебаний соответствовала частоте, выявленной при поломке рабочей лопатки 3-й ступени компрессора двигателя НК-12.

Практика эксплуатации ГТД и других роторных машин показывает, что наиболее эффективным методом контроля и диагностики их технического состояния в эксплуатации является вибродиагностика. Автор справедливо указывает, что несмотря на множество работ, посвященных вибродиагностике, не в полной мере проработаны вопросы оценки изменения вибрационного состояния редукторов ГТД при износе их зубьев. Не решена проблема достоверности диагностических признаков, полученных в условиях испытательного стенда при перестановке двигателя в состав летательного аппарата. В этой связи следует признать, что тема диссертационных исследований Сундукова А.Е., посвященных разработке диагностических признаков и методов анализа динамических процессов и оценки технического состояния планетарных редукторов ГТД, является актуальной.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа Сундукова А.Е. состоит из введения, восьми разделов, заключения, списка используемой литературы из 362 наименований и восьми приложений изложена на 321 странице, содержит 166 рисунков, 22 таблицы. Структура и оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11–2011 «Диссертация и автореферат диссертации».

Во введении к диссертации обоснована актуальность рассматриваемой научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены данные об апробации работы, её структуре и объёме.

В первой главе в результате выполненного автором анализа публикаций по теме диссертации автором сформулированы выводы, послужившие основой для выбора цели и задач исследований в диссертационной работе.

Вторая глава содержит описание предложенных автором новых методов выявления диагностических признаков дефектов. При этом **метод оценки технического состояния редуктора, нечувствительный к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата** позволяет использовать в качестве диагностических признаков дефектов не только характеристики интенсивности динамических процессов, но и параметры мгновенных значений частоты узкополосного колебания. Основной отличительной особенностью метода является его нечувствительность к перестановке двигателя с испытательного стенда в состав объекта и возможность использования в качестве источника диагностической информации сигналов штатных тахометрических датчиков частот вращения роторов ГТД. Метод основан на анализе параметров мгновенной частоты узкополосного процесса, девиация которой определяется частотной модуляцией (ЧМ) от влияющих факторов: работа системы поддержания относительного постоянства частоты вращения ротора двигателя на стационарном режиме, технологических (погрешности изготовления и сборки зубчатого зацепления), эксплуатационных (частота вращения, температура, передаваемая нагрузка), конструктивных (податливость деталей привода, модификация рабочих поверхностей зубьев) и износа боковых поверхностей зубьев.

Метод демодуляции на основе анализа максимумов широкополосной вибрации редуктора ГТД основан на анализе максимумов широкополосной вибрации вместо её мгновенных значений. Отличительной особенностью метода является получение модулирующих составляющих во всём исследуемом частотном диапазоне. При этом расширяется частотный диапазон полученных модулирующих составляющих при каскадной демодуляции, так как выделение максимумов широкополосной вибрации является её первым шагом. Повышается чувствительность биполярного анализа.

Третья глава посвящена оценке основных погрешностей и влиянию внешних условий на оценку диагностических признаков.

В четвертой главе представлены результаты разработок имитационной модели пары «солнечная шестерня - сателлиты» и моделей ширины спектральных линий зубцовой составляющей и частоты вращения выходного вала редуктора. Наиболее сложным и трудоёмким является выбор диагностиче-

ских признаков. Применение различного рода моделей позволяет на основе использования математических методов их анализа существенно сократить указанные затраты на их разработку. Планетарные редукторы ГТД генерируют сложный комплекс колебательных процессов. В качестве прототипа использована имитационная модель виброакустического сигнала в окрестностях гармоник основной частоты возбуждения дефектного узла механизма, предложенная в работе М.Д. Генкина и А.Г. Соколовой. Разработанные модели позволяют предложить ряд новых диагностических признаков износа зубьев редуктора ГТД.

Пятая глава содержит сведения об объёме исследованного экспериментального материала, оценку потенциальной опасности генерируемой вибрации, обоснование истинного источника резонансных колебаний элементов конструкции двигателя. Анализировалась вибрация 18 двигателей после ремонта и 15 двигателей, пришедших в ремонт. При исследовании рассматривались четыре варианта износа боковых поверхностей зубьев:

- текущий - максимальный износ зубьев центральной внутренней шестерни относительно эвольвенты после последнего ремонта;
- текущий полный - максимальный износ зубьев центральной внутренней шестерни относительно исходной эвольвенты;
- текущий суммарный - сумма максимальных износов зубьев центральной внутренней шестерни и сателлитов относительно эвольвентограмм после последнего ремонта;
- суммарный полный - сумма максимальных износов зубьев центральной внутренней шестерни и сателлитов относительно исходных эвольвент.

Возбуждение крутильных колебаний на других наиболее интенсивных составляющих исследуемого ряда не выявлено. Следовательно, при развитии износа возбуждаются крутильные колебания вращающейся системы на частоте составляющей с кратностью 19,145, вызывающие резонансные колебания элементов конструкции компрессора двигателя.

Шестая глава посвящена разработке диагностических признаков (ДП) износа боковых поверхностей зубьев. При этом использовались как разработанные методы анализа сигналов, так и известные. Показана возможность диагностики величины износа по уровню вибрационного шума в частотных

полосах 12965-14770 Гц и 25000-27800 Гц. В них находятся частоты составляющих $3f_{z1}$ и $6f_{z1}$, интенсивность которых не превышает уровня вибрационного шума. Приведены примеры структурных диагностических признаков. Установлено, что использование максимумов широкополосной вибрации приводит к расширению почти на порядок частотного диапазона каскадной демодуляции.

В седьмой главе представлены результаты разработки диагностических признаков величины бокового зазора в паре «солнечная шестерня - сателлиты». Общее число разработанных диагностических признаков рассматриваемых дефектов редукторов ГТД более ста. Такое их разнообразие позволяет решать задачу диагностики рассматриваемых дефектов с разными вариантами наличия технических и методических средств.

В восьмой главе описаны практические аспекты применения разработанных подходов. Одна из проблем разработки и применения методик диагностики дефектов авиационных ГТД заключается в том, что, как правило, их создание осуществляется на материале, полученном на испытательном стенде завода-изготовителя, а использование - в условиях эксплуатации на объекте. Кроме того, для двигателей НК-12 и его модификаций на стенде и объекте используются разные типы воздушных винтов АВ-60К и АВ-60Т. Полученные результаты показывают, что диагностические признаки, выявленные методом оценки характеристик девиации мгновенных значений частоты узкополосного процесса не чувствительны к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам исследований, свидетельствующие о достижении поставленной цели. Приведены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Содержание диссертации Сундукова А.Е. соответствует паспорту специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы Сундукова А.Е. опубликованы в 57 работах, в том числе 25 статей в периодических изданиях, включённых в

перечень ВАК России, и 27 публикаций в изданиях, индексируемых РИНЦ, получено 5 патентов на изобретения.

Научной новизной выполненной диссертации обладают:

1. Метод оценки технического состояния редуктора, нечувствительный к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата.
2. Метод демодуляции на основе анализа максимумов широкополосной вибрации редуктора ГТД.
3. Имитационная математическая модель вибрационного состояния пары «солнечная шестерня - сателлиты» планетарного редуктора при развитии износа зубьев.
4. Комплекс математических моделей, позволяющий оценивать ширину спектральных линий: зубцовой составляющей вибрации, сигнала частоты вращения выходного вала редуктора в вибрационном процессе и в сигнале штатного тахометрического датчика.
5. Установленная возможность использования динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков не только для оценки частот вращения валов ГТД, но и для диагностики износа зубьев редуктора.
6. Комплекс новых диагностических признаков на основе анализа сигналов вибрации и динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков.

Теоретическая и практическая значимость результатов состоит в том, что разработанные методы анализа динамических процессов расширяют научные основы выявления дефектов роторных машин. Предложенные автором модели создают теоретическую базу для выявления новых типов диагностических признаков, не применяемых ранее в практической деятельности.

Разработанные подходы внедрены и используются на предприятиях ПАО «ОДК-Кузнецов», АО «НК Дулисьма», ООО «НПС».

Достоверность и обоснованность научных результатов, положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации подтверждается корректной физической и математической постановкой задач, сопоставлением результатов с данными других исследователей, успешным их использованием в практике применения на ряде предприятий, контрольной разборкой двигателя и сопоставлением фактических значений величины из-

носа с данными диагностики. Полученные результаты имеют ясную физическую трактовку и внутреннюю непротиворечивость.

Замечания

1. В работе дано обоснование критерия узкополосности вибрационного процесса варианта, присутствие чистого шума без гармонической составляющей в 23% от центральной частоты вибрационного процесса и модулированного вибрационного шума гармонической составляющей – 30%. Однако при выполнении анализа априори не понятно, какой процесс рассматривается и как поступать на практике при выборе ширины фильтра?

2. Основное внимание в работе уделено частотным характеристикам. Указано, что использованы показания штатных тахометров. Приведены также амплитудные характеристики, но не указано, измерялись ли значения виброскорости или виброускорений, в каких сечениях и в каких направлениях колебания (продольные, поперечные)? Какими приборами они измерялись?

3. Для предложенных диагностических признаков требуется определить «уставки» (предельно допустимые отклонения от номинальных значений).

4. Приведены данные по изменению значений диагностических признаков в зависимости от наработки. Однако приведены данные для ограниченного диапазона. Было бы полезно показать фазовую траекторию изменения диагностического признака (например, амплитуды виброскорости или виброускорения) для этапа приработки, продолженной эксплуатации и последнего этапа - с нарастающей амплитудой, как признака необходимости съема с эксплуатации.

5. Обзор работ, приведенный во второй главе, следовало бы провести в первой главе.

Заключение

Считаю, что несмотря на сделанные замечания, диссертация «Разработка методов анализа динамических процессов и оценки технического состояния планетарных редукторов ГТД», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной проблемы в области

авиационного двигателестроения, соответствует требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Сундуков Александр Евгеньевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электро- ракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Кривошеев Игорь Александрович.
профессор кафедры авиационных двигателей,
д.т.н., профессор



Контактная информация: Телефон: +7-9033118102

E-mail: krivosh777@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

450008, Российская Федерация, Приволжский федеральный округ,
Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

