

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу
Сундукова Александра Евгеньевича, выполненной на тему
«Разработка методов анализа динамических процессов и оценки технического состояния
планетарных редукторов ГТД»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки лета-
тельных аппаратов.

Актуальность темы диссертации

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена важнейшей научно-технической задаче, стоящей перед современной российской авиацией, поскольку парк воздушных судов отечественного производства имеет значительную наработку и для его безопасной эксплуатации крайне необходима информация о текущем техническом состоянии. Особенно это касается авиационных двигателей как наиболее нагруженных узлов самолетов, причем планетарные редукторы газотурбинных двигателей (ГТД) являются одними из самых напряжённых узлов. Их использование в турбовинтовых и турбовентиляторных двигателях требуют совершенствования и создания новых методов контроля и оценки технического состояния. Особенности авиационных редукторов является высокие частоты вращения роторов и зубчатых колес, а также значительная передаваемая мощность, что приводит к огромным контактным напряжениям в зубчатых зацеплениях и, соответственно, износу боковых поверхностей зубьев. Наиболее нагруженным зубчатом зацеплением планетарных редукторов является пара «солнечная шестерня – сателлиты», повышенный износ зубьев которой приводит к снижению плавности зацепления и ударному сопряжению изношенных зубьев. Это вызывает рост интенсивности генерации вибрации, возбуждающей резонансные колебания элементов конструкций двигателей.

Автором вполне справедливо обосновал актуальность темы диссертации, приведя достаточное количество данных по дефектам турбовинтового двигателя НК-12МП с планетарным редуктором, доводка которого включала предотвращение обрывов лопаток 3-й ступени компрессора и устранение трещин на дисках ряда ступеней, а также разрушение дисков 3 и 7 ступеней. Причем увеличение тяги данного двигателя потребовало использование модернизированного, «тяжелого» винта АВ-60Т, требующего большей передаваемой через редуктор мощности, что еще в большей степени актуализировало необходимость диагностирования состояния планетарного редуктора НК-12МПМ, «слабым местом» которого является пара «солнечная шестерня – сателлиты». Именно износ зубьев которой и являлся интенсивным источником крутильных колебаний ротора двигателя. Автором также показано, что актуальность решаемой в диссертации проблемы

Входящий № 206-9123
02 АЕН 2024
Самарский университет

ется не только семейством двигателей НК-12, но и наличием схожих задач на других ГТД: Д-27, АЛ-31Ф, двигателя самолета Ан-12 и других.

Поскольку автор диссертации определил в качестве цели работы повышение достоверности оценки технического состояния планетарных редукторов ГТД, то в качестве основной информации о динамических процессах, протекающих в объекте исследования, являются вибрационные сигналы, колебания частоты вращения роторов и другие периодические процессы. В соответствии с этим Сундуковым А. Е. в диссертации успешно использованы и развиты методы и подходы вибрационной диагностики роторных машин. Несмотря на серьезные достижения вибродиагностики в последнее время, автор справедливо отмечает недостаточное развитие методов оценки влияния износа боковых поверхностей зубьев на вибрационное состояние планетарных редукторов. Отмечается также отсутствие математических моделей, учитывающих изменение их вибрационного состояния при развитии износа и других дефектов. Имеющиеся в распоряжении специалистов диагностические признаки недостаточно информативны и зачастую достаточно значительно зависят от условий получения вибросигналов (в стендовых или объектовых).

В этой связи 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 включает введение, восемь разделов, заключение, список используемой литературы из 362 наименований и восемь приложений и изложена на 321 странице, содержит 166 рисунков, 22 таблицы.

Структура и оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям к докторским диссертациям.

Во введении к диссертации достаточно подробно обосновывается актуальность и значимость проблемы повышения эффективности вибродиагностических систем идентификации технического состояния роторов авиационных ГТД и, особенно, их редукторов, 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 первом разделе выполнен детальный критический анализ большого количества опубликованных работ в области вибродиагностики износа зубьев и бокового зазора в зубчатых зацеплениях авиационных редукторов. В результате данного анализа сформулированы выводы, послужившие основой для выбора цели и задач исследований в диссертационной работе.

Во втором разделе представлены разработанные автором новые методы выявления диагностических признаков дефектов роторных машин. **Важнейшим достижением автора, с моей точки зрения, является то, что он наряду с интенсивностью колебательно-го процесса, использует также девиацию частоты процесса,** что позволило ему обеспечить независимость диагностических признаков от условий получения входной информации. Это обусловлено равенством частот вращения роторов двигателя в условиях испытаний на заводских стендах и на летательном аппарате.

В результате этого разработан **метод оценки технического состояния редуктора, нечувствительный к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата.** 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.

На базе параметров интенсивности колебательного процесса автором разработан **метод демодуляции на основе анализа максимумов широкополосной вибрации редуктора ГТД.** Данный метод основан на анализе максимумов широкополосной вибрации и его отличительной особенностью 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.

Третий раздел посвящён оценке основных погрешностей при цифровой обработке сигналов, выбору ширины фильтра, а также учета влияния внешних условий на оценку диагностических признаков.

В четвертом разделе представлены разработанные автором:

- имитационная модель возбуждаемых частот основным источником планетарного редуктора - парой «солнечная шестерня - сателлиты» при наличии дефектов;
- модели ширины спектральных линий зубцовой составляющей и частоты вращения выходного вала редуктора;
- модели возбуждаемых роторными машинами вибраций при разцентровке роторов.

Применение диагностических моделей позволяет на основе использования математических методов их анализа существенно сократить указанные затраты на разработку диагностических признаков. Планетарные редукторы ГТД генерируют сложный комплекс

колебательных процессов. В качестве прототипа использована имитационная модель виброакустического сигнала в окрестностях гармоники 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.

Пятый раздел 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, с кратностью 19,145, вызывающие резонансные колебания элементов конструкции компрессора двигателя.

Шестой раздел посвящён 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 седьмом разделе представлены результаты разработки диагностических признаков величины бокового зазора в паре «солнечная шестерня - сателлиты». Автором разработано около ста диагностических признаков, позволяющих решать задачу диагностики износа зубьев авиационных редукторов.

В восьмом разделе 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 приведены основные выводы по результатам исследований, свидетельствующие о достижении поставленной цели. Даны рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

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

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 57 работах, в том числе 25 статей в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК РФ, 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. Установлена 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 автором разработаны новые методы анализа динамических периодических процессов, суще-

ственно расширяющих методологическую и научную базу идентификации дефектов авиационных редукторов и других роторных машин. Предложенные автором диагностические модели на основе девиации частоты позволили впервые использовать штатные тахометрические датчики в качестве диагностических средств.

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

Замечания

1) Наиболее информативными признаками ДП с математической модели в виде комбинации линейной и экспоненциальной частей при назначенной нормы по точке перехода линейной части в экспоненциальную. Приращение линейной части до точки перехода незначительно, что приводит к невысокой наработке до остановки эксплуатационной машины.

2) Наибольшее увеличение интенсивности составляющих ряда с шагом $3f_p^*$ с ростом износа выявлено для гармоники $2/3f_z$. Было бы целесообразно провести более подробный её анализ с точки зрения возбуждения от её резонансных центральных колёс редуктора и рабочих лопаток турбокомпрессора.

3) Имеется также ряд замечаний по структуре текста диссертации, например, важнейший четвертый раздел, посвященный разработке математических моделей диагностирования, следует за разделом по оценке погрешностей анализа периодических процессов. Также отсутствует подраздел «выводы и результаты первого раздела».

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 завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной проблемы в области авиационного двигателестроения, соответствует критериям и требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О

