

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.379.10, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20 декабря 2024 г. №12
о присуждении Сундукову Александру Евгеньевичу, гражданину Российской
Федерации, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка методов анализа динамических процессов и
оценки технического состояния планетарных редукторов ГТД» по
специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов принята к защите 16 сентября 2024 г.
(протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.379.10, созданным
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика С.П. Королева»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (443086,
г. Самара, Московское шоссе, 34), приказом Минобрнауки России от 14
февраля 2023 г. № 229/нк.

Соискатель Сундуков Александр Евгеньевич, 30 сентября 1981 года
рождения. Диссертацию «Совершенствование методов диагностических
признаков технического состояния ГТД на основе спектра широкополосной
вибрации» на соискание учёной степени кандидата технических наук
защитил 10 июня 2011 года в диссертационном совете Д 212.215.02,
созданном на базе ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева (национальный
исследовательский университет)».

Сундуков А.Е. работает директором по производству ООО «ПКФ «ТСК»
и по совместительству в должности старшего научного сотрудника Института
акустики машин (НИИ-201) федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Самарский
национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской
Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре автоматических систем энергетических установок имени академика РАН Владимира Павловича Шорина федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – академик РАН, д.т.н., профессор Шахматов Евгений Владимирович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», заведующий кафедрой автоматических систем энергетических установок имени академика РАН Владимира Павловича Шорина.

Официальные оппоненты:

– Виноградов Василий Юрьевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический

университет имени А.Н. Туполева КАИ», профессор кафедры «Конструирование и технология производства электронных средств»;

– Кривошеев Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», профессор кафедры «Авиационные двигатели»;

– Рабинский Лев Наумович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения», - дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - **Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», г. Москва**, в своём положительном отзыве, подписанном заместителем генерального директора – директором исследовательского центра «Динамика, прочность, надёжность» Ножницким Юрием Александровичем, председателем НТС, начальником отдела «Прочность, ресурс и оптимальное проектирование», к.т.н. Калининым Дмитрием Владимировичем, указала, что диссертационная работа Сундукова А.Е. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой содержится решение проблемы оценки технического состояния НК-

12 и его модификаций на основе разработанных методов, моделей и комплекса диагностических признаков дефектов методов, имеющей важное значение для обеспечения безаварийной эксплуатации двигателей с приводом воздушных винтов и вентиляторов через планетарный редуктор. Работа соответствует специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, установленным Положением о присуждении учёных степеней, ее автор Сундуков А.Е. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Соискатель имеет 57 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 57 работ, из них 25 статей опубликовано в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, и 27 статей в изданиях, индексируемых РИНЦ, получено 5 патентов на изобретения.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

Статьи в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК:

1. Вибродиагностика величины бокового зазора в зубчатом зацеплении дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А.Е. Сундуков, Е.В. Сундуков, А.Н. Крючков, С.М. Плотников // Вестник Московского авиационного института. – 2020. Т.27. № 3. – С. 198 – 208 (научная статья 1,38 п.л./0,6 п.л.)

2. Имитационная модель колебаний пары «солнечная шестерня – сателлиты» планетарного редуктора при наличии дефектов на боковых поверхностях зубьев / А.Е. Сундуков, Е.В. Сундуков, А.Н. Крючков, С.М. Плотников // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. Том 18, №4. – С. 87–95. (научная статья 1,13 п.л./0,8 п.л.)

3. Использование сигналов с датчиков частоты вращения валов газотурбинного двигателя в диагностике технического состояния его редуктора / А.Е. Сундуков, Е.В. Сундуков, С.М. Плотников, А.А. Авраменко [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Том 19, №1. – С. 7 – 17 (научная статья 1,38 п.л./0,62 п.л.)

4. Исследование характеристик составляющей вибрации редуктора газотурбинного двигателя, вызывающей усталостные поломки элементов его конструкции при износе боковых поверхностей зубьев / А.Е. Сундуков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроение. – 2020. Т. 19, №4. – С. 70–79 (научная статья 1,25 п.л.)

5. Совершенствование методов вибродиагностики износа зубьев шестерён дифференциального редуктора турбовинтового двигателя / А.Е. Сундуков, Е.В. Сундуков, С.М. Плотников, А.А. Авраменко [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроение. – 2018. Т. 17. № 3. – С.16–26. (научная статья 1,38 п.л./ 0,7 п.л.)

6. Сундуков, А.Е. Влияние износа и величины бокового зазора на вибрационное состояние редуктора ГТД / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Динамика и виброакустика. – 2023. Т.9 №2. – С. 13–17. (научная статья 0,63 п.л./ 0,4 п.л.)

7. Сундуков, А.Е. Диагностические признаки износа боковых поверхностей зубьев на основе анализа параметров зубцовой спектральной составляющей / А.Е. Сундуков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. Т. 21, №3. – С. 141–149. (научная статья 1,13 п.л.)

8. Сундуков, А.Е. К вопросу нормирования диагностических признаков износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского Университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. Т. 21, №2. – С. 28–37. (научная статья 1,25 п.л./ 0,72 п.л.)

9. Сундуков, А.Е. Комплекс диагностических признаков износа зубьев редукторов авиационных газотурбинных двигателей / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. Т. 21, № 4. – С. 109–117. (научная статья 1,13 п.л./ 0,62 п.л.)

10. Сундуков, А.Е. Модели ширины спектральной линии частоты вращения выходного вала редуктора газотурбинного двигателя / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского Университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2024. Т2. – С. 157–166. (научная статья 1,25 п.л./ 0,62 п.л.)

11. Сундуков, А.Е. Модель ширины спектральной составляющей зубцовой гармоник редуктора турбовинтового двигателя / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского Университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. Т. 22. №4. – С.135–144. (научная статья 1,25 п.л./ 0,75 п.л.)

12. Сундуков, А.Е. Новые методы выявления диагностических признаков технического состояния редукторов авиационных ГТД / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского Университета.

Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. Т.22, №2. – С. 105–115. (научная статья 1,38 п.л./ 0,92 п.л.)

13. Сундуков, А.Е. Обоснование выбора ширины фильтра при использовании спектра огибающей в вибродиагностике дефектов роторных машин / А.Е. Сундуков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технология и машиностроение. – 2020. Т. 19, №3. – С. 100–108. (научная статья 1,13 п.л.)

14. Сундуков, А.Е. Оценка влияния места постановки двигателя и типа воздушного винта на диагностические признаки износа зубьев его редуктора / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Московского авиационного института. – 2022. Т.24, №4. – С. 208–218. (научная статья 1,38 п.л./ 0,65 п.л.)

15. Сундуков, А.Е. Повышение чувствительности и расширение области применения биполярного анализа вибрации роторных машин / А.Е. Сундуков, Е.В. Шахматов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2022. Т. 21, №1. – С. 91–98. (научная статья 1 п.л./ 0,85 п.л.)

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Из материалов совместных публикаций лично соискателю принадлежат: Метод оценки технического состояния редуктора, нечувствительный к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата за счёт использования выявленных диагностических признаков по параметрам девиации мгновенных значений частоты узкополосного процесса вибрации и частоты вращения вала ГТД, метод демодуляции на основе анализа максимумов широкополосной вибрации редуктора ГТД, обеспечивающий выявление и существенное повышение чувствительности диагностических признаков в широком диапазоне частот вибрационного процесса двигателя, способ определения критерия узкополосности для использования спектра огибающей, способ оценки параметров текущей частоты узкополосного случайного процесса, способ диагностики дефектов зубьев зубчатых колёс редуктора ГТД по сигналам его тахометрических датчиков, способ оценки изменения энергетической ширины спектральной составляющей вибрации машин, способ диагностики дефектов зубьев зубчатых колёс редуктора турбовинтового двигателя, способ оценки параметров частотной модуляции, способ оценки параметров амплитудной модуляции при анализе широкополосной вибрации (спектр максимумов), способ каскадной демодуляции с использованием максимумов широкополосной вибрации роторных машин, способ вибродиагностики технического состояния

зубчатых зацеплений (биполярный анализ), способ диагностики дефектов кинематических пар роторных машин. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат диссертации поступило одиннадцать отзывов от организаций:

1. ПАО «ОДК-Кузнецов», отзыв подписан экспертом ОКБ СГК ПАО «ОДК-Кузнецов», к.т.н. Е.П. Кочеровым, утверждён генеральным конструктором к.т.н. П.В. Чупиным.

2. АО «ОДК-КЛИМОВ», отзыв подписан заместителем начальника ОКБ по расчетам А.А. Мусеевым, ведущим инженером-конструктором, к.т.н. А.Е. Гинзбургом, ведущим инженером-конструктором А.Н. Шубиным.

3. ФГКВООУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, отзыв подписан д.т.н., профессором кафедры восстановления авиационной техники Поповым А.В.

4. ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», отзыв подписан заведующим кафедрой «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» к.т.н., профессором Решенкиным А.С.

5. ПАО «ОДК-Сатурн», отзыв подписан председателем научно-технического совета Филиала ПАО «ОДК-Сатурн»-ОМКБ, И.А. Шаповаловым, начальником отдела зубчатых передач, маслосистем и подшипников, к.т.н. В.Н. Климовым.

6. АО «ОДК-Авиадвигатель», отзыв подписан управляющим директором-генеральным конструктором, академиком РАН, профессором А.А. Иноземцевым.

7. АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», отзыв подписан заместителем генерального директора – генеральным конструктором АО «ОДК», д.т.н., профессором Ю.Н. Шмотиным, главным специалистом – учёным секретарём научно-технического совета ОДК, к.т.н. В.П. Ляпиным.

8. ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», отзыв подписан заведующим кафедрой «Оборудование и технологии машиностроительного производства», к.т.н, доцентом Н.Ю. Логиновым.

9. АО «Казанское моторостроительное производственное объединение», отзыв подписан инженером-конструктором службы главного конструктора газотурбинных двигателей, к.т.н., доцентом С.А. Кусюмовым, заместителем

генерального директора по техническому развитию АО «КМПО» А.Ю. Скащенко, начальником отдела персонала А.А. Гурьяновым.

10. ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технических университет имени П.А. Соловьева», отзыв подписан профессором кафедры «Инновационное машиностроение», д.т.н. Семеновым А.Н., заведующим кафедрой «Проектирование машин», к.т.н. Болотеиным А.Н.

11. «Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки» филиала ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение», отзыв подписан ведущим конструктором отдела 3000 к.т.н. Зубко А.И., утверждён генеральным конструктором-директором Марчуковым Е.Ю.

Критическими замечаниями из отзывов являются: нет подробного анализа спектральных составляющих зубцовой гармоника пары «шестерня – вал – эпицикл»; недостаточно подробно описано влияние параметров профильной модификации зубьев солнечной шестерни, применяемой в процессе производства двигателя НК-12; при рассмотрении вопроса нормирования дана оценка допустимой величины износа для диагностического признака, однако не приведено анализа развития степени износа при эксплуатации двигателей с привязкой к их ресурсным показателям и наработке; 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; для предложенных диагностических признаков требуется определить «уставки» (предельно допустимые отклонения от номинальных значений); приведены данные по изменению значений диагностических признаков в зависимости от наработки, а 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; наибольшее увеличение интенсивности составляющих ряда с шагом $3f_p^*$ с ростом износа выявлено для гармоника $2/3f_z$. Было бы целесообразно провести более подробный её анализ с точки зрения возбуждения от её резонансных центральных колёс редуктора и рабочих лопаток турбокомпрессора.

В полученных отзывах отмечено, что указанные замечания в целом не снижают высокой оценки работы, а сама диссертационная работа

соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, и сделано заключение о возможности присуждения Сундукову А.Е. учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Выбор Виноградова В.Ю. в качестве официального оппонента обосновывается компетенциями исследований в области оценки технического состояния ГТД при исследовании динамических процессов двигателей.

Выбор Кривошеева И.А. в качестве официального оппонента обосновывается компетенциями исследований в области теории динамики роторов и исследования параметров компрессоров, что отражено, в том числе в большинстве научных работ, посвящённых оценке параметров турбокомпрессоров ГТД.

Выбор Рабинского Л.Н. в качестве официального оппонента обосновывается наличием компетенций и исследований в области оценки динамических параметров ГТД, что отражено в научных трудах оппонента.

Выбор Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», г. в качестве ведущей организации обусловлен тем, что предприятие является лидером в отрасли оценки технического состояния газотурбинных двигателей и обосновывается наличием компетентных специалистов, одним из которых является доктор технических наук, заместитель генерального директора — директор исследовательского центра «Динамика, прочность, надёжность» Ножницкий Ю.А., в свою очередь являющийся одним из ведущих специалистов в области надёжности и эксплуатации газотурбинных двигателей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны:

– метод оценки технического состояния редуктора, нечувствительный к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата за счёт использования выявленных диагностических признаков по параметрам девиации мгновенных значений частоты узкополосного процесса вибрации и частоты вращения вала ГТД.

– метод демодуляции на основе анализа максимумов широкополосной вибрации редуктора ГТД, обеспечивающий выявление и существенное повышение чувствительности диагностических признаков в широком диапазоне частот вибрационного процесса двигателя.

– имитационная математическая модель вибрационного состояния пары «солнечная шестерня - сателлиты» планетарного редуктора при развитии износа зубьев, отличающаяся наличием основных генерируемых составляющих вибрации, что позволяет выявить дополнительные диагностические признаки износа и идентифицировать источник резонансных колебаний элементов конструкции компрессора двигателя.

– 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, учитывающий рост ширины зубцовой компоненты с развитием износа зубчатого зацепления, что позволило предложить новые диагностические признаки оценки технического состояния ГТД.

– установлена возможность использования динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков не только для оценки частот вращения валов ГТД, но и для диагностики износа зубьев редуктора.

– комплекс новых диагностических признаков на основе анализа сигналов вибрации и динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков, позволяющий оценивать износ зубчатого зацепления редукторов ГТД, для обеспечения надёжности в процессе эксплуатации.

предложены нетрадиционные подходы в оценке технического состояния ГТД путём исследования сигналов штатных тахометрических датчиков, а также к вопросу нормирования технического состояния газотурбинного двигателя и его узлов.

доказано, что

– улучшена достоверность оценки технического состояния двигателя НК-12 путём повышения чувствительности биполярного анализа на 70% и расширения практически на порядок частотного диапазона каскадной демодуляции, благодаря новому разработанному методу оценки параметров демодуляции вибрационного сигнала на основе анализа максимумов широкополосной вибрации ГТД,

– выявленная взаимосвязь вибрационного состояния редуктора при износе его зубьев с техническим состоянием лопаток и дисков компрессора двигателя, позволившая на примере двигателя НК-12МППМ установить источник резонансных колебаний на составляющей частоте вращения ротора кратной 19,145;

– взаимосвязь возможности использования сигналов штатных тахометрических датчиков не только для оценки частот вращения валов ГТД,

но и для диагностики технического состояния его редуктора, что существенно повышает эксплуатационную технологичность, а также надёжность, упрощает процедуру оценки его технического состояния в условиях эксплуатации за счет исключения проведения соответствующих дополнительных виброизменений.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработан ряд моделей и методов, позволившие предложить комплекс диагностических признаков технического состояния редукторов газотурбинных двигателей, в том числе обладающих существенной новизной:

- разработан комплекс новых диагностических признаков дефектов на основе анализа вибрации и сигналов штатных тахометрических датчиков планетарных редукторов ГТД, существенно расширяющий возможности оценки их технического состояния. Для части из них предложено соответствующее программное обеспечение, включённое в пакет программ исследования причин повышенной вибрации ГТД, выпускаемых ПАО «ОДК – Кузнецов» и ряда других организаций;

- предложен метод устранения необходимости пересчёта уровней интенсивности диагностических признаков износа редуктора ГТД, построенных на базе интенсивностей вибрации, которые получены в условиях стенда, при переходе на объект, за счёт использования разработанных диагностических признаков на основе параметров мгновенных значений частоты узкополосного процесса вибрации и частоты вращения вала ГТД, что практически в два раза сокращает затраты при разработке методик диагностики дефектов за счёт исключения необходимости дополнительных измерений сигналов в условиях эксплуатации;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- обеспечена возможность существенного упрощения оценки технического состояния редукторов ГТД в эксплуатации на объекте за счёт только анализа сигналов штатных тахометрических датчиков частот вращения входного и выходного роторов;

разработаны и внедрены:

- рекомендации по назначению норм на диагностические признаки износа для обеспечения надёжности двигателя в эксплуатации;

- программные продукты обработки сигналов и методики мониторинга технического состояния планетарных редукторов ГТД;

– результаты исследований на предприятиях ПАО «ОДК–Кузнецов», АО «НК Дулисьма», ООО «НПС», что подтверждается актами внедрения.

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы сигналы штатных тахометрических датчиков в качестве диагностической информации для оценки технического состояния ГТД.

изложены

– подходы в оценке состояния редуктора ГТД за счёт предложенного метода оценки технического состояния редуктора, нечувствительного к перестановке двигателя со стенда в состав летательного аппарата за счёт использования выявленных диагностических признаков по параметрам девиации мгновенных значений частоты узкополосного процесса вибрации и частоты вращения вала ГТД;

– предложены алгоритмы методов оценки технического состояния редуктора ГТД на основе возможности использования динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков не только для оценки частот вращения валов ГТД, но и для диагностики износа зубьев редуктора.

раскрыты существенные проявления теории в вопросах нормирования. Так, например, в результате применения разработанных моделей и методов выявлены диагностические признаки, описываемые линейной, степенной, экспоненциальной и комбинацией линейной и экспоненциальной математическими зависимостями. Показано, что для первых трех зависимостей, при обосновании уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ, целесообразно следовать рекомендациям действующей нормативной документации. Для последней зависимости в качестве нормы следует принять точку перехода линейной её части в экспоненциальную. На примере двигателя НК-12 для обеспечения надёжности в процессе эксплуатации на протяжении ресурса степень износа зубчатого зацепления следует установить 0,02 мм.

изучены

- изменения уровней интенсивности диагностических признаков технического состояния ГТД, полученных в результате стендовых испытаний при перестановке двигателя в состав летательного аппарата и предложены решения, нечувствительные к этим явлениям;

– взаимосвязь оценки технического состояния редуктора ГТД по анализу разработанной имитационной математической модели вибрационного состояния пары «солнечная шестерня – сателлиты», позволяющая выявить источники резонансных колебаний элементов конструкции ГТД;

– взаимосвязь возможности использования износа зубьев шестерён с динамическими характеристиками сигналов штатных тахометрических датчиков не только для оценки частот вращения валов ГТД, но и для диагностики технического состояния его редуктора, что существенно повышает эксплуатационную технологичность, а также надёжность, упрощает процедуру оценки его технического состояния в условиях эксплуатации за счет исключения проведения соответствующих дополнительных виброизменений;

– взаимосвязь вибрационного состояния редуктора при износе его зубьев с техническим состоянием лопаток и дисков компрессора двигателя, что позволило на примере двигателя НК-12МПП установить источник резонансных колебаний на составляющей частоте вращения ротора кратной *19,145*.

проведена модернизация

– метода оценки параметров демодуляции вибрационного сигнала на основе анализа максимумов широкополосной вибрации ГТД, позволяющий в несколько раз расширить частотный диапазон выделения модулирующих компонентов. Улучшена достоверность оценки технического состояния двигателя НК-12 путём повышения чувствительности биполярного анализа на 70% и расширения практически на порядок частотного диапазона каскадной демодуляции;

– имитационной математической модели вибрационного состояния пары «солнечная шестерня - сателлиты» планетарного редуктора при развитии износа зубьев, отличающаяся наличием основных генерируемых составляющих вибрации, что позволяет выявить дополнительные диагностические признаки износа и идентифицировать источник резонансных колебаний элементов конструкции компрессора двигателя.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

представлен комплекс методик оценки технического состояния редукторов ГТД: «Методика оценки величины износа зубьев на основе анализа изменения ширины и формы зубцовой спектральной составляющей», «Методика оценки величины бокового зазора на основе анализа интенсивности зубцовой гармоника», «Методика оценки износа боковых поверхностей зубьев шестерён редуктора изделия НК-12 МП (НК-12МПП) по сигналу штатного тахометрического датчика частоты вращения вала заднего винта в условиях эксплуатации», «Методика вибродиагностики износа зубьев шестерён редуктора изделия НК-12МПП» (утверждена ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова и использовалась при проведении ГСИ

модернизированного турбовинтового двигателя на объекте). Получены патенты на изобретения: Патент № RU 2717139 С1, Патент № RU 2737993 С1, Патент № RU 2750846 С1, Патент № RU 2783467 С1, Патент № RU 2792713 С1.

разработана и внедрена методика вибродиагностики износа зубьев шестерён редуктора изделия НК-12МП (НК-12МПП):

– ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт № М-03194-СГК-23-МП) при получении результатов при оценке износа зубьев шестерён редуктора модернизированного турбинного двигателя;

– АО «НК Дулисьма» (акт от 22.12.2022 г.) при эксплуатации электростанций ПАЭС-2500 с газотурбинным двигателем АИ-20;

– ООО «Нефтеюганскпромсервис» (акт от 02.02.2023 г.) при выявлении расцентровок приводов и нагрузки, как при оценке технического состояния двигателя АИ-20.

Методика вибродиагностики износа зубьев шестерен редуктора изделия НК-12МП (НК-12МПП), согласованная с ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» использовалась в совместных государственных летных испытаниях на объекте ВП-021.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты исследований получены на поверенных средствах измерений, аттестованном испытательном оборудовании и стенде, обеспечивающем воспроизводимость результатов исследования, подтверждёнными методическими разработками;

теория построена на известных, проверенных положениях математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей, математической статистики, аналитической геометрии, вычислительной математики, цифровой обработки сигналов, теории колебаний и конечных элементов и согласуется с опубликованными данными по теме диссертации и смежным темам;

идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта в области оценки технического состояния ГТД за счёт анализа динамических процессов авиационных двигателей, заключающегося в оценке технического состояния редукторов и узлов, а также влияния условий эксплуатации на оценку технического состояния ГТД;

апробированы основные теоретико-методические положения в рамках научных публикаций в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК; достоверность и обоснованность научных положений, выводов, результатов и рекомендаций исследования подтверждается и обеспечивается положительными оценками докладов

соискателя на международных и всероссийских научно-практических конференциях;

установлено качественное и количественное совпадение результатов численных и натурных экспериментов;

– совпадение теоретических положений с данными экспериментов и результатами исследований других авторов;

– экспертизами ВНИИГПЭ с признаками ряда решений патентами РФ;

– подтверждение разборкой двигателей данных, полученных при выполнении измерений на объекте.

Личный вклад соискателя состоит в:

– непосредственном участии соискателя в получении исходных данных и научных экспериментах;

– выполненных при участии автора обработке и интерпретации экспериментальных данных;

– разработанных методов, математической модели и алгоритмов, апробации результатов исследования;

– выполненных при участии автора подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертационной работы не было высказано критических замечаний. Соискатель Сундуков А. Е. на все задаваемые в ходе заседания вопросы.

Диссертация Сундукова А.Е. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук (пункт 9 Положения о присуждении учёных степеней). В диссертации разработаны методы и средства обеспечения надёжности двигателей за счёт повышения достоверности оценки технического состояния планетарных редукторов и компрессоров ГТД путём разработки моделей и методов анализа вибрации и динамических составляющих сигналов штатных тахометрических датчиков. Это подтверждается улучшением достоверности оценки технического состояния двигателей НК-12 и НК-12МППМ путём повышения чувствительности биполярного анализа на 70% и определения источника резонансных колебаний элементов двигателя.

Полученные результаты диссертационного исследования могут быть использованы при производстве и ремонте авиационных ГТД и энергетических установок на предприятиях двигателестроения, таких как АО «ОДК-ПМ» (г. Пермь), ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа), «ОДК-Газовые турбины» (г. Рыбинск), ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), АО «218 AP3» (г.

Гатчина) и АО НПЦ Газотурбостроения «Салют» (г. Москва), АО «ОДК-Климов» (г. Санкт-Петербург), АО «ММП имени В.В.Чернышева» (г. Москва), филиал АО «ОДК» «ОМО им. П.И. Баранова» (г. Омск), АО «НПП «Аэросила» (г. Ступино), ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург), ПАО «ОДК–Кузнецов» (г. Самара), АО «НК Дулисьма» (г. Москва), ООО «НПС» (г. Самара) и иных.

В результате теоретических и экспериментальных исследований решена научная проблема обеспечения надёжности авиационных ГТД за счёт повышения достоверности оценки технического состояния планетарных редукторов и компрессоров двигателей.

На заседании 20 декабря 2024 года диссертационный совет за решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, принял решение присудить Сундукову Александру Евгеньевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя

диссертационного совета 24.2.379.10

д.т.н., доцент



Прокофьев А.Б.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.2.379.10

д.т.н., доцент

23.12.2024

Виноградов А.С.