

На правах рукописи

Позднякова Екатерина Дмитриевна

**Разработка измерительной фазохронометрической технологии
сопровождения жизненного цикла трансмиссии летательного
аппарата**

Специальность 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Комшин Александр Сергеевич

Доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
заведующий кафедрой метрологии и
взаимозаменяемости

Официальные оппоненты:

Яшин Андрей Валерьевич

Доктор технических наук
АО «Научно-исследовательский и проектно-
конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном
транспорте», руководитель центра
метрологического обеспечения

Чернова Александра Валентиновна

Кандидат технических наук
ФГБУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт метрологической
службы», заместитель начальника отдела
координации научных исследований и разработок

Ведущая организация:

ФГБУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт оптико-физических
измерений»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2024 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33*3628

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
кандидат технических наук



Сырицкий Антони Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время вопросы обеспечения безопасности технических объектов стоят особенно остро и требуют подходов на качественно новом уровне. Необходимость предотвращения техногенных катастроф и возможность снижения количества аварий в авиации и космической сфере являются одними из важных задач общества. Научное и технологическое развитие авиационной отрасли отражено в Стратегии научно-технического развития РФ (утверждена Указом Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145); Концепции технологического развития на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р); Комплексной программой развития авиационной отрасли до 2030 года (в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.03.2023 № 563-р).

В настоящее время в мире насчитывается более 46 тысяч гражданских и военных вертолётов. Средний рассчитанный срок службы машин составляет 25 лет. Для каждого критически важного узла или агрегата вертолетной техники назначается своя суммарная наработка, при достижении предельного значения которой, вне зависимости от текущего технического состояния, эксплуатация прекращается. Однако на практике в результате отсутствия возможности выполнения парка воздушных судов необходимо продлять срок службы по результатам экспертизы текущего технического состояния, инструментами в которой служит визуальный осмотр, экспертное мнение специалистов и традиционные методы диагностики, что не всегда позволяет оценивать индивидуальные особенности каждого из вертолетов. Что, как следствие, приводит к трудности своевременного обнаружения предвестников поломки, например, повреждений в труднодоступных местах конструкции. В результате возникает повышенный риск неожиданного выхода из строя различных агрегатов.

Степень научной разработанности проблемы. К области разработки систем мониторинга и диагностики высокоответственных агрегатов летательных аппаратов относятся исследования Головкина М.А., Голованова В.В., Каргопольцева В.А., Солдаткина В.М., Ишина Н.Н., Гомана А.М., к области метрологического обеспечения жизненного цикла и надежности работы Киселёва М.И., Петроневича В.В., Гаденина М.М., Махутова Н.А., Ножницкого Ю.А., Минеева Б.И., среди иностранных авторов можно отметить авторов Dawei Shi, Baoshan Huang, Andrew D. Ball, следует также отметить исследования компаний Bentley Nevada, Honeywell, Sytrac.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»: 1. Создание новых научных, технических и нормативно-методических решений, обеспечивающих повышение качества продукции. 8. Создание и совершенствование системы метрологического обеспечения приборостроения, в том числе цифровых технологий.

Цель диссертации заключается в разработке научно-методических подходов, методов и средств метрологического обеспечения мониторинга и диагностики конструктивных частей трансмиссии вертолета на базе фазохронометрического подхода.

Для достижения поставленной цели в диссертации были определены следующие **задачи**:

1. Провести научно-обоснованный анализ существующих в настоящее время подходов к мониторингу технического состояния и диагностике конструктивных элементов вертолета, и определить критерии градации измеряемых характеристик в зависимости от критичности контролируемых элементов.

2. Обосновать и разработать научно-методический подход к мониторингу и определению частотных характеристик конструктивных элементов трансмиссии вертолета на базе фазохронометрического метода.

3. Провести экспериментальные исследования на стенде трансмиссии с применением фазохронометрической системы с учетом влияния дисбаланса и возможностью измерения крутящего момента.

4. Разработать фазохронометрическую технологию и научно обосновать возможность ее применения для трансмиссии вертолета.

5. Разработать требования к метрологическому обеспечению, методику измерения крутящего момента, оценки влияния дисбаланса на валу трансмиссии, оценки технического состояния подшипниковых опор и промежуточного редуктора с использованием фазохронометрической технологии на трансмиссии вертолета.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложен и научно обоснован подход к мониторингу технического состояния и определению частотных характеристик конструктивных частей трансмиссии вертолета на базе фазохронометрического метода.

2. Впервые предложена и апробирована измерительная фазохронометрическая технология сопровождения жизненного цикла трансмиссии, реализованная на этапе испытаний.

3. Получены частотные характеристики крутильных колебаний конструктивных элементов трансмиссии вертолета на базе фазохронометрической технологии. Исследованиями установлено и доказано, что полученные частотные характеристики представляют устойчивые качественно и изменяющиеся количественно диагностические признаки штатного функционирования валопровода трансмиссии.

4. Реализована и исследована методика измерения крутящего момента трансмиссии вертолета фазохронометрической системой.

Практическая значимость работы

1. Результаты работы приняты к использованию, представляют теоретическую и практическую полезность для проведения испытаний трансмиссии и редуктора вертолета при разработке новой техники АО «НЦВ Миль и Камов» (письмо от 12.02.2024 №10-01/5074).

2. Результаты работы приняты к внедрению в целях диагностики трансмиссии летательных аппаратов. В период с 2021 по 2023 гг. на базе АО «НЦВ Миль и Камов» в целях разработки опытного образца системы мониторинга и отработки элементов измерительной фазохронометрической технологии проведена оценка технических решений для создания экспериментального образца измерительной системы (Акт ООО «НПО ПКРВ» от 29.08.2024 №1).

3. Результаты диссертации поддержаны в рамках проекта, в котором соискатель являлся исполнителем: Государственное задание 9.4968.2017/БЧ «Разработка научных основ и методов повышения точности измерительно-вычислительных фазохронометрических технологий поддержки жизненного цикла высокотехнологичных объектов машиностроения». Срок выполнения 2017-2019 г.г.

4. На базе полученных результатов в рамках диссертационной работы разработаны учебно-методические материалы, включённые в учебные дисциплины кафедры метрологии и взаимозаменяемости МГТУ им. Н.Э. Баумана: «Общая теория измерений», «Метрология и физико-технические измерения», «Информационная поддержка жизненного цикла продукции», входящие в учебный план кафедры.

Методы исследования. При решении поставленных задач применялись методы анализа и обобщения теоретических и практических материалов, научных трудов в сочетании с использованием методов теории и анализа случайных процессов в технике, методов планирования эксперимента, теоретической механики, теории колебаний, сопротивления материалов, а также математический аппарат прикладной метрологии, анализа временных рядов. Измерения производились современными измерительными средствами и апробированными методиками. Обработка результатов осуществлялась на персональных компьютерах с применением методов теории обработки результатов многократных измерений, методов теорий случайных сигналов и спектрального анализа, отвечающих требованиям прикладной метрологии.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и в производственных условиях организаций МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО «НПО ПКРВ», АО «НЦВ Миль и Камов».

На защиту выносятся основные положения:

1. Научно-методический подход к мониторингу технического состояния и определению частотных характеристик конструктивных частей трансмиссии вертолета на базе фазохронометрического метода.

2. Измерительная фазохронометрическая технология сопровождения жизненного цикла трансмиссии, реализованная на этапе испытаний.

3. Полученные частотные характеристики крутильных колебаний, связанные с конструкцией трансмиссии вертолета на базе фазохронометрической технологии, представляющие устойчивые качественно и изменяющиеся количественно диагностические признаки штатного функционирования валопровода трансмиссии.

4. Фазохронометрическая технология позволяет определять влияние дисбаланса на примере трансмиссии вертолета при относительно малых массах (не более 0,002 %).

5. Предложенная система измерения крутящего момента непосредственно на валу трансмиссии с помощью измерительной фазохронометрической технологии.

Достоверность результатов. При проведении испытаний и измерений были использованы аттестованные методики и поверенные средства измерений. Также достоверность полученных результатов обеспечивается за счет согласования результатов теоретических расчетов с результатами эксперимента.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы представлены и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии», Москва, 2016; XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС, Москва, 2016; XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Состояние и проблемы измерений», Москва, 2017; V Международный Балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», Калининград, 2017; X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России», Москва, 2017; Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», Москва, 2017; Юбилейная XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения, Москва, 2018; XII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России», Москва, 2019; Всероссийский научно-практический семинар «Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля», п. Менделеево, 2024; XVII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России», Москва, 2024.

Основные результаты диссертации были получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Была проанализирована научная литература и патенты, относящиеся к теме диссертации, спланированы и проведены эксперименты, а также обработана полученная измерительная информация.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, пять глав, основные результаты и выводы, список литературы, приложение. Объем диссертации 152 страницы, содержит 61 рисунок, 9 таблиц, список литературы из 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены полученные новые результаты.

В первой главе рассмотрены и проанализированы подходы к метрологическому обеспечению на этапах создания новой техники. Установлены четыре группы агрегатов в зависимости от уровня критичности. Показано, что существующие системы диагностики построены на градации измеряемых характеристик в зависимости от критичности контролируемого элемента конструкции.

Рассмотрены основные существующие подходы и методы сопровождения и поддержки жизненного цикла объектов машиностроения, а также методы и способы исследования свойств конструкционных материалов.

Представлены примеры применения фазохронометрического метода, обеспечивающего возможность ранней предаварийной диагностики. Установлена

необходимость разработки измерительной технологии сопровождения эксплуатации трансмиссии с использованием фазохронометрического метода.

Во второй главе рассмотрены основные этапы разработки измерительной фазохронометрической технологии сопровождения жизненного цикла трансмиссии винтокрылых летательных аппаратов.

Построение измерительной технологии на базе фазохронометрического метода дает ряд преимуществ. Такая измерительная технология имеет высокий метрологический уровень вследствие прослеживаемости измеряемой физической величины – времени к эталону.

На начальном этапе разработки технологии определяется набор параметров, подлежащих контролю, устанавливается перечень дефектов, которые могут возникать в процессе работы и производится их ранжирование по уровню критичности.

Основные виды дефектов конструктивных критических узлов:

1. Подшипниковые опоры – усталостное выкрашивание дорожек и тел качения, усталостное разрушение сепаратора, заклинивание подшипника.
2. Зубчатые колеса – прогрессивное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев; разрушение одной из шестерен; заедание шестерен.
3. Валы – разбалансировка; разрушение крепежа; раскрытие стыка фланца вала; возникновение и последующий рост трещин в теле вала.
4. Шлицевые и пластинчатые муфты – разрушение пластин и зубьев.

Среди технологических параметров работы механизма трансмиссий важным является оценка крутящего момента в определенных сечениях вала и обнаружение весового дисбаланса, например, на хвостовом валу.

Второй этап заключается в анализе конструкции, определении фаз рабочего цикла и его отдельных элементов. Количество фаз, на которые будет разбит рабочий цикл трансмиссии или ее отдельных элементов напрямую зависит от особенностей конструкции.

Третьим этапом при разработке измерительной технологии с использованием ФХМ подхода является предварительный анализ частот. Характеристики частот основных конструктивных элементов исследуемой трансмиссии рассматриваются в диапазоне до 1 кГц.

Согласно теореме Котельникова, произвольный сигнал, спектр которого ограничен некоторой частотой ϑ может быть полностью восстановлен по последовательности своих отсчетных значений, следующих с интервалом времени (1):

$$\Delta t = \frac{1}{2n\vartheta}, \quad (1)$$

где ϑ – частота, ограничивающая спектр, Гц;

Δt – интервал времени, с которым следуют отсчетные значения, с;

n – количество фаз.

Номинальная частота вращения валопровода трансмиссии летательного аппарата составляет 2800 об/мин. С учетом (1) конструктивных особенностей и возможностей реализации системы рабочий цикл необходимо разбить на 48 импульсов.

Следующий этап – разработка математической модели рабочего цикла с использованием систем дифференциальных уравнений. Математическая модель в ФХМ представлении описывает механизм с привязкой к измерению параметров вращения элементов трансмиссии и сопоставление результатов моделирования с данными специальных ФХМ датчиков, установленных в конструкции агрегата. Таким образом обеспечивается непрерывный обмен данными в системе «математическая модель – объект». Примером представления математической модели является модель крутящего момента в виде дифференциального уравнения вида (2):

$$M_{кр} = k_1 \dot{\varphi}_в + q_p \Delta\varphi = k_1 \ddot{\varphi}_в + (\varphi_м - \varphi_в) \quad (2)$$

где $M_{кр}$ - крутящий момент;

k_1 - момент инерции электродвигателя стенда;

$\varphi_в, \varphi_м$ - углы поворота дисков при скручивании вала;

q_p - крутильная жесткость.

Тогда, согласно (2), внешний крутящий момент при постоянной частоте вращения, то есть при $\ddot{\varphi}_в = 0$, будет равен:

$$M_{кр} = q_p (\varphi_м - \varphi_в), \quad (3)$$

Стационарно система находится в равновесном состоянии с точки зрения баланса ее мощностей. Любой дефект приводит к нарушению этого баланса. Что отражается в хронограммах вращения в виде резких изменений интервалов времени.

Четвертый этап – определение мест установки датчиков с точки зрения получения наиболее полной информации о работе частей машины. Расположение датчиков обуславливается конструктивными особенностями трансмиссии.

Для анализа работы редуктора для регистрации фаз рабочего цикла устанавливаются два датчика. Один на входном валу перед угловым редуктором, другой на выходном валу, непосредственно после углового редуктора. Использование специального индуктора совместно с вихретоковыми датчиками позволяют определять крутящий момент на валу трансмиссии.

Дальнейшим шагом в разработке измерительной технологии является проведение прецизионных измерений вариаций интервалов времени. Данные измерения должны осуществляться в соответствии с методикой проведения фазохронометрических измерений. Результатами измерений являются ряды интервалов времени для фаз рабочих циклов вращения элементов трансмиссии.

На этапе обработки результатов измерений происходит сравнение полученных диагностических признаков, их изменений в течение времени с фазохронометрическим портретом правильного функционирования.

Предложен алгоритм измерительной технологии сопровождения эксплуатации трансмиссии воздушного судна в фазохронометрическом представлении в виде единой концепции (Рисунок 1).

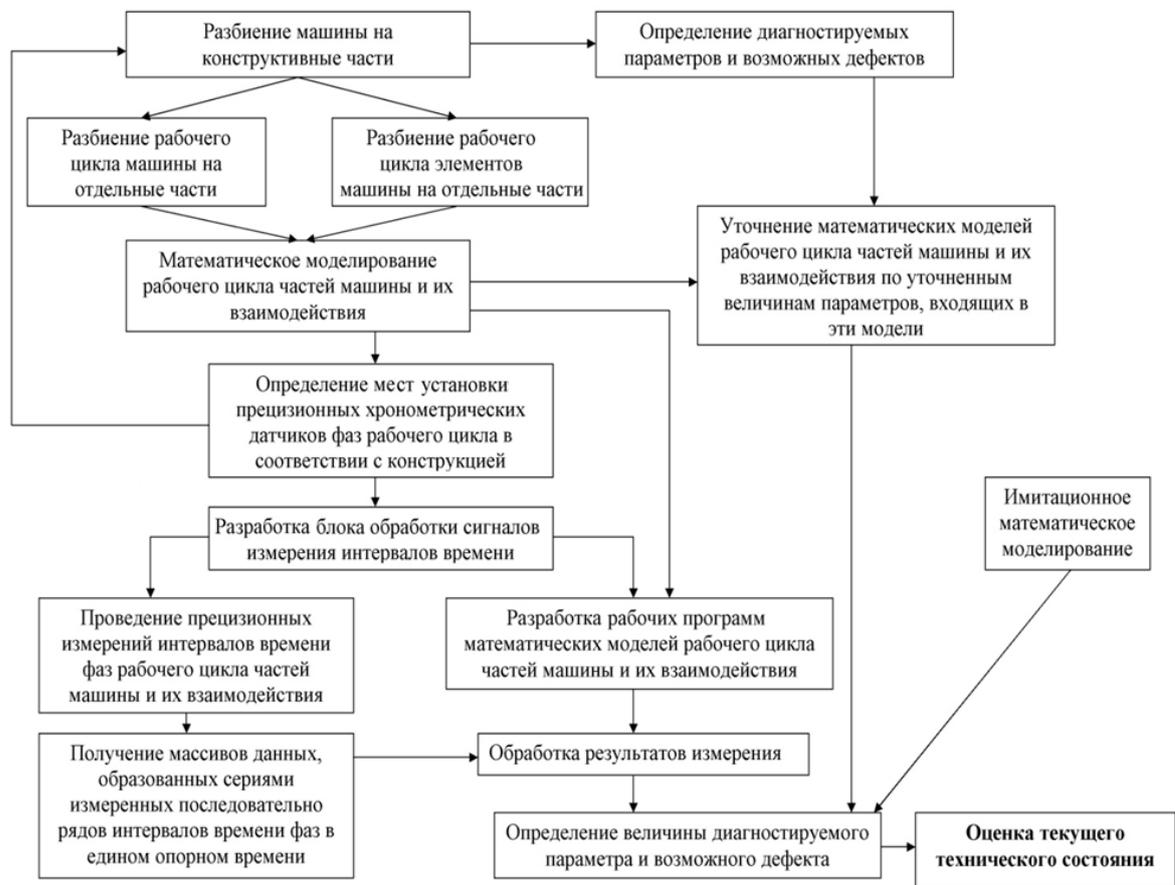


Рисунок 1. Алгоритм измерительной ФХМ технологии

В третьей главе представлено практическое применение фазохронометрического метода для получения информации о работе трансмиссии.

В настоящее время на стенде для испытания трансмиссии установлены штатные системы измерения крутящего момента, температуры и параметров вибрации. Результаты измерения, полученные со штатных систем, могут быть использованы для сравнения с результатами фазохронометрической системы.

Схема испытательного стенда представлена на Рисунке 2, который состоит из электродвигателя (1), подшипниковых опор (2, 3, 4, 5), промежуточных валов (6, 7, 8, 9), промежуточного редуктора (10), хвостового вала (11) и хвостового редуктора (12), информационных элементов (13,14).

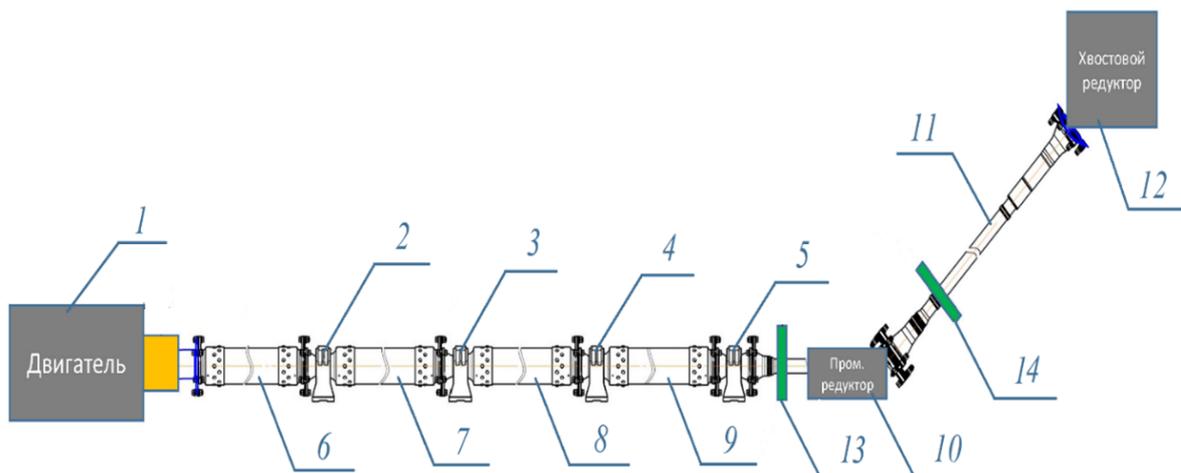


Рисунок 2. Схема испытательного стенда

Объектом испытаний на стенде является макет фазохронометрической системы для получения информации о функционировании трансмиссии винтокрылого летательного аппарата.

Модель валопровода трансмиссии описывается системой дифференциальных уравнений (4):

$$\begin{cases} m\ddot{x} + k_1\dot{x} + qx + k(\dot{x} + \dot{\varphi}_2 y) = qe\cos\varphi_2; \\ m\ddot{y} + k_1\dot{y} + qy + k(\dot{y} - \dot{\varphi}_2 x) = qe\sin\varphi_2 - mg; \\ J_1\ddot{\varphi}_1 + k_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + q_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1(\dot{\varphi}_1); \\ J_2\ddot{\varphi}_2 + k_{12}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + q_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) = \\ = -M_2 + qe(y\cos\varphi_2 - x\sin\varphi_2) - mg\cos\varphi, \end{cases} \quad (4)$$

где x, y – координаты центра тяжести валопровода в неподвижной системе координат;

k_1, k – коэффициенты внешнего и внутреннего затухания при изгибных колебаниях;

k_{12} – коэффициент затухания при крутильных колебаниях;

q – жесткость валопровода;

e, J_2, m – эксцентриситет, момент инерции и масса валопровода;

M_1 и M_2 – движущий момент и момент сопротивления;

J_1 – момент инерции электродвигателя;

φ_1, φ_2 – углы поворота вала электродвигателя и валопровода.

В условиях численного моделирования производные $\dot{x}, \ddot{x}, \dot{y}, \ddot{y}, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$ в рассматриваемой модели определяются методом конечных разностей, что определяет привязку к экспериментальным данным измерения времени.

В любой системе мощность, выдаваемая электродвигателем, переходит в полезную с незначительными потерями вследствие влияния внешних факторов, например, от трения. При рассмотрении системы, состоящей из электродвигателя, вала, подшипниковых опор и соединительных муфт общий вид уравнения баланса мощности будет записан в виде (5):

$$M_0\omega_0 = (M_1\omega_3 + M_2\omega_3) + M_3\omega_3, \quad (5)$$

где M_0 – момент силы двигателя;

ω_0 – угловая скорость вращения вала двигателя;

M_1 – момент сопротивления, соответствующий первому подшипнику;

M_2 – момент сопротивления, соответствующий второму подшипнику;

M_3 – крутящий момент вала;

ω_3 – угловая скорость вращения вала.

Уравнение баланса мощностей при постоянной мощности двигателя учитывает начальное состояние и состояние в текущий момент времени. Тогда для уравнения (5) будет справедливо следующее преобразование (6):

$$(M_{30} + M_{10} + M_{20})\omega_3 = (M_{31} + M_{11} + M_{21})\omega_1 \quad (6)$$

Индексы 0 и 1 обозначают начальное и текущее состояние системы соответственно.

Для перехода в фазохронометрическую плоскость угловая скорость вращения определяется выражением (7):

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau k} \quad (7)$$

Тогда выражение (6) в фазохронометрическом представлении примет вид (8):

$$(M_{30} + M_{10} + M_{20}) \frac{2\pi}{\tau_0 k} = (M_{31} + M_{11} + M_{21}) \frac{2\pi}{\tau_1 k}, \quad (8)$$

где τ_0, τ_1 – определяемые кратные доли оборота вала;
 k – количество кратных долей оборота.

Изменения в системе, такие как дефекты тел и дорожек качения, проскальзывания, ослабления подшипниковых опор, дефекты вала оказывают непосредственное влияние на угловую скорость вращения этих конструктивных элементов. Вследствие чего нарушается баланс мощности системы. Так, например, нарушения, связанные с выходом из строя подшипников, вызывают скачкообразное повышение момента сопротивления в соответствующей подшипниковой опоре и, как следствие, на хронограмме вращения будут проявляться резкие изменения интервалов времени.

Разработана измерительная фазохронометрическая система, обеспечивающая решение задач сопровождения жизненного цикла, мониторинга и диагностики.

В процессе разработки системы проведено обоснование выбора датчиков в соответствии с технологической возможностью монтажа на различных участках трансмиссии и представлены схемы их установки на специально разработанной оснастке. Для измерения крутящего момента выбраны вихретоковые датчики ВБ2.12М.33.4.1.1.К фирмы Мега-К. Для реализации оптической системы выбраны светодиод инфракрасной области спектра модели АЛ1107А и фотодиод ФДУК-5СТ с величиной времени нарастания фронта до 2 нс.

С помощью разработанной математической модели валопровода трансмиссии выполнен вычислительный эксперимент в фазохронометрическом представлении. Сравнение расчетной и экспериментальной хронограмм, а также их дальнейшая спектральная обработка позволяют получать информацию о дефектах циклических механизмов, в том числе находящихся на стадии зарождения.

Проведены испытания макета фазохронометрической системы. Данные испытания показали возможность реализации метода для диагностики трансмиссии на этапе испытаний.

В четвертой главе представлена обработка измерительной информации, полученной с использованием фазохронометрической технологии на трансмиссии вертолёта.

В течение жизненного цикла эксплуатационные характеристики трансмиссии вертолёта количественно изменяются в результате естественного износа оставаясь при этом качественно неизменными. ФХМ обеспечивает выявление таких характеристик. Информация о техническом состоянии содержится в рядах интервалов времени (Рисунок 3), регистрируемых фазохронометрической системой.

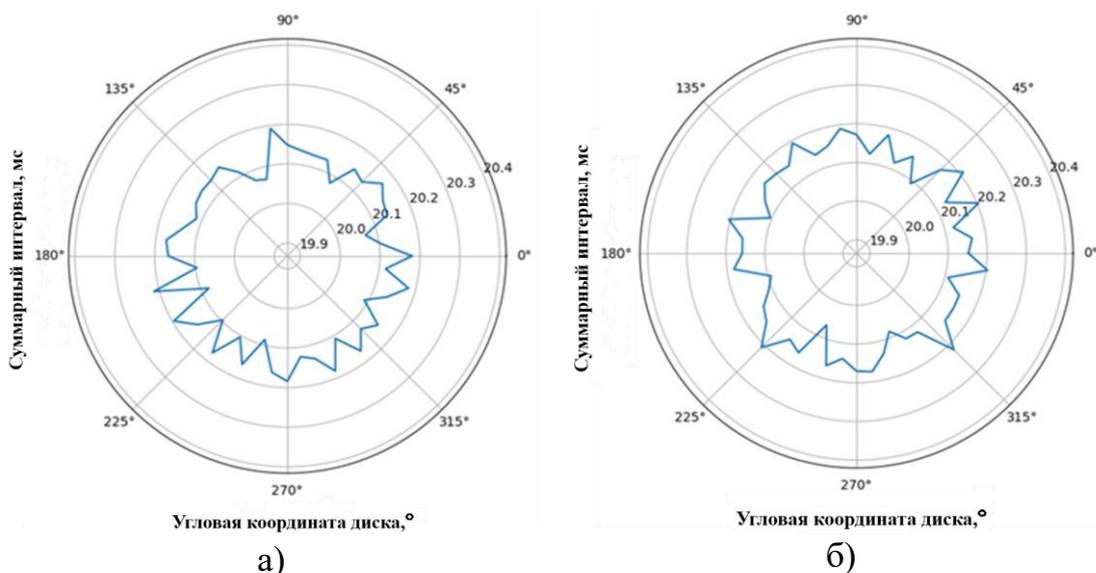


Рисунок 3. Круговые хронограммы вращения, ХХ 2800 об/мин

Спектральный анализ полученных результатов измерений показал, что на качественном уровне разнесенные во времени количественные показатели собственных частот крутильных колебаний циклических элементов в отсутствии внешних воздействий совпадают в пределах установленного значения погрешности в соответствии с принятой практикой вертолетостроения. Метрологический уровень фазохронометрической системы позволил выявить особенности, связанные с процессом функционирования трансмиссии.

Каждому конструктивному элементу подшипника (телам качения, внутренней и наружной дорожкам качения, а также сепаратору) соответствуют свои значения собственных частот вращения. Так, подшипник 85-176212 внутри редуктора имеет 16 тел качения. Расчетное значение частоты их перекатывания по внутреннему кольцу составляет 310,80 Гц. На спектре крутильных колебаний отчетливо видна частота в области $309,5^{+0,9}_{+0,2}$ Гц.

В Таблице 1 приведены расчетные значения собственных частот элементов подшипников.

Таблица 1 – Собственные частоты элементов подшипников

Обозначение подшипника	F_H , Гц	F_B , Гц	F_C , Гц	F_{TK} , Гц
6-32211	320,57	426,63	20,04	161,20
6-3156211	380,39	366,81	23,77	164,46
6-4286113	474,46	459,54	23,72	186,98
5-32212	320,86	426,34	20,05	162,10
85-176212	310,80	296,29	23,91	124,95
6-32215	362,89	477,71	20,16	167,77
5-276214	309,67	390,83	20,65	128,62
5-110	262,78	344,32	20,21	170,70

Частота F_H - значение интенсивности перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника, F_B - значение интенсивности перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника, F_C - значение частоты,

соответствующее вращению сепаратора, F_{TK} - значение частоты, соответствующее контакту тел качения с одним из колец подшипника.

На Рисунке 4 представлены спектры частот различных элементов подшипников, используемых в трансмиссии.

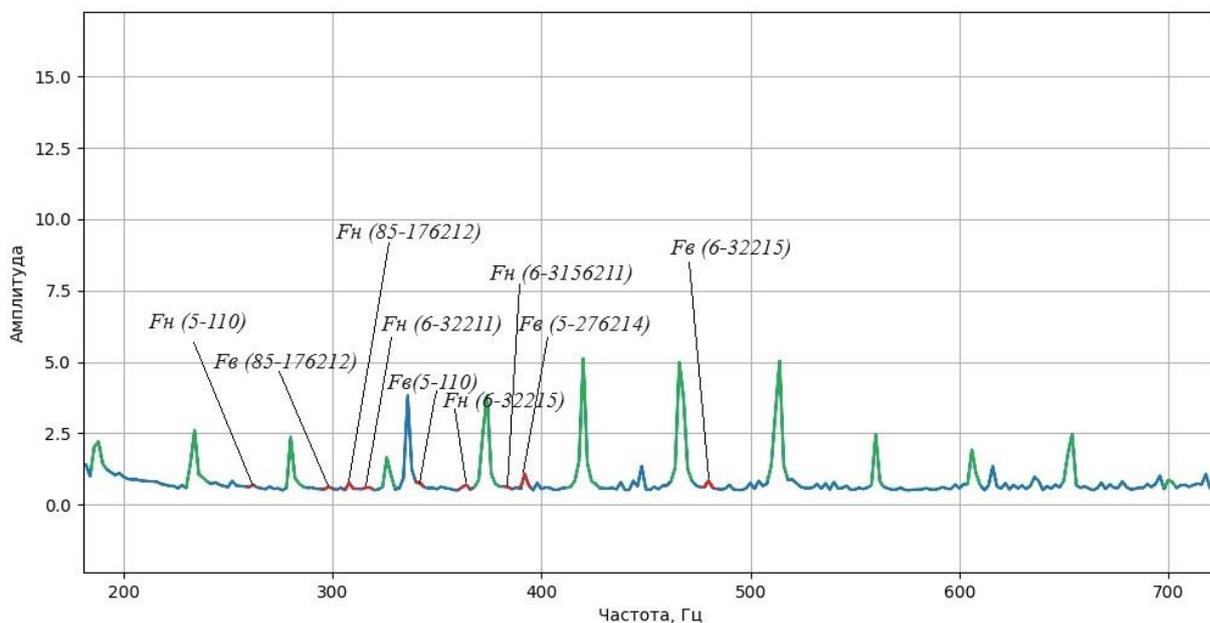


Рисунок 4. Спектры частот элементов подшипников

Таким образом, разработанная система на базе фазохронометрического метода позволяет идентифицировать отдельные элементы конструкции трансмиссии летательного аппарата и дает возможность более детального анализа внутренних частей этих элементов.

На Рисунке 5 приведено сравнение спектров сигнала с датчика на входном валу при наличии (оранжевым цветом) и отсутствии (синим цветом) нагрузки.

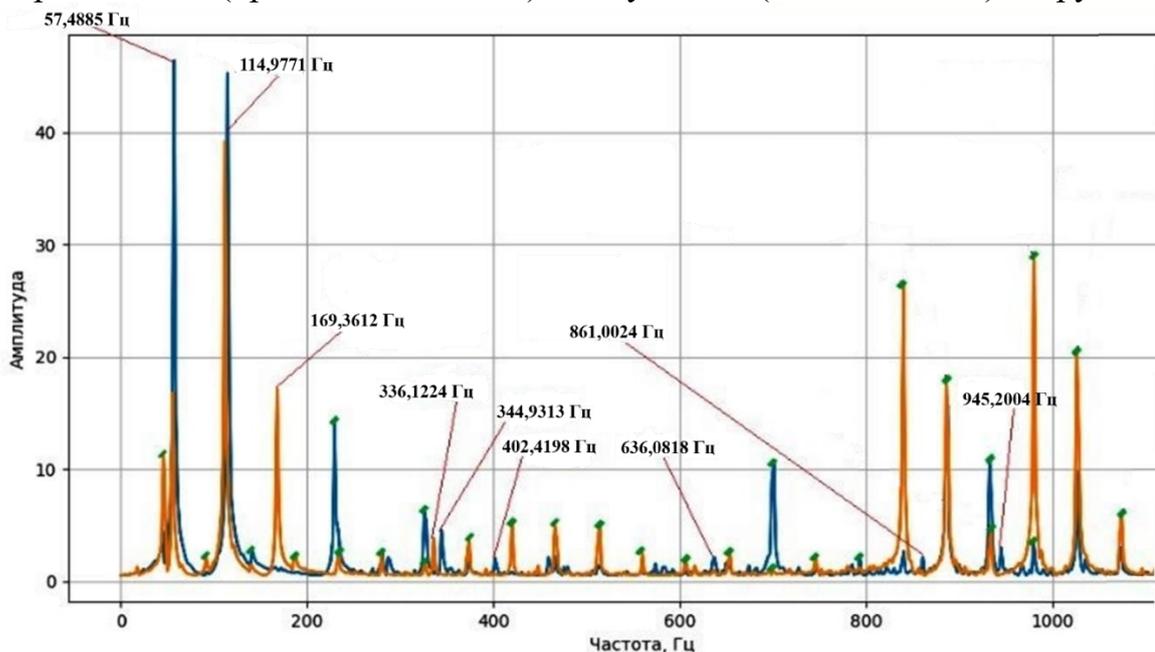


Рисунок 5. Сравнение спектров сигнала с датчика на входном валу при наличии и отсутствии нагрузки

При нагрузке появляется резкое увеличение амплитуды спектра в высокочастотной области. Проявляются частоты, отражающие особенности работы редуктора в нагруженном состоянии (169,36 Гц, 336,12 Гц).

В процессе испытаний получены результаты косвенного измерения момента в соответствии с методикой измерений, приведенной в Главе 2. Результаты измерения показали, что расхождение значений со штатным датчиком момента составляет не более 1 %.

По результатам эксперимента, проведенного в разных режимах с использованием груза относительной массой 0,0017%, определен набор частот, которые приняты в качестве основного ФХМ портрета испытательного стенда трансмиссии вертолета. Среди них: частоты, относящиеся к дисбалансу при отсутствии нагрузки (55,11 Гц, 707,03 Гц); частоты, относящиеся к дисбалансу при наличии нагрузки, фиксируемые датчиком на входном валу (114,34 Гц, 230,17 Гц, 287,62 Гц, 345,32 Гц, 401,14 Гц, 460,05 Гц, 560,08 Гц, 828,11 Гц) и на выходном валу (111,11 Гц, 168,14 Гц, 335,30 Гц, 391,84 Гц).

В пятой главе проведена оценка погрешности измерительной фазохронометрической системы. Расчет метрологических характеристик измерительного канала показал, что для минимизации погрешности необходимо учитывать величину точность изготовления информационных элементов, точность их расположения при установке и сборке, а также изменение размеров вследствие отклонения условий проведения измерений от нормальных.

Изменение ширины паза и диаметра делительной окружности вследствие влияния угла отклонения вызывает изменение в скорости прохождения каждого из пазов. Погрешность измерения времени из-за отклонения диска при установке составит (9):

$$\Delta_{\text{уст.д}} = \frac{1}{F \cdot N} \left(1 - \cos \left(\arcsin \frac{\Delta x}{d_0} \right) \right) = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}, \quad (9)$$

где d_0 – диаметр середины паза прецизионного диска;

Δx – предельное отклонение диска при сборке;

F – частота вращения вала;

N – количество меток на диске.

Определение интервалов времени вследствие погрешности изготовления определяется временем, за которое произойдет смещение паза диска на эту величину в пределах одного оборота (10):

$$\Delta_{\text{изг.д}} = \frac{\Delta \varphi}{360^\circ} \cdot \frac{1}{n} = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ с}, \quad (10)$$

где $\Delta \varphi$ – допуск углового положения кромок диска;

n – частота вращения.

Отличие температуры проведения измерений от нормальных условий вызывает изменение ширины паза прецизионного диска с учетом коэффициента линейного расширения материала (11):

$$\Delta_{\text{тем.д}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot \frac{d_0 \cdot \pi}{z_d \cdot l} \cdot \frac{1}{n} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ с}, \quad (11)$$

где l – длина окружности по делительному диаметру;

α – коэффициент линейного расширения материала информационного диска;

Δt – отклонение температуры проведения измерений от нормальных условий;
 Z_d – количество зубьев.

Общая величина погрешности измерения интервалов времени при использовании оптической системы составит (12):

$$\Delta_{\Sigma\text{опт}} = 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{\text{уст.д}}^2 + \Delta_{\text{изг.д}}^2 + \Delta_{\text{темп.д}}^2)} = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ с} \quad (12)$$

Основной вклад в общую погрешность измерения вносит первичный преобразователь. Для обеспечения возможности получения результата измерения с использованием фазохронометрической системы погрешность применяемых первичных преобразователей не должна превышать $1 \cdot 10^{-7}$ с. Результаты апробации методики оценки погрешности первичных преобразователей подтвердили, что суммарная погрешность фазохронометрической технологии не превышает $5 \cdot 10^{-4} \%$.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан научно-методический подход к системе мониторинга динамических элементов винтокрылых летательных аппаратов с использованием фазохронометрического метода. Фазохронометрический подход доказал свою работоспособность на различных циклических механизмах. Уровень его метрологического обеспечения позволяет оценивать медленные изменения в работе агрегатов, а сам метод может применяться для оценки текущего состояния элементов трансмиссии.
2. Установлено и количественно определено, что наиболее критическими узлами являются такие элементы трансмиссии ВКЛА, как подшипниковые опоры, зубчатые колеса, валы, муфты, узлы трансмиссий, что говорит о необходимости определения технического состояния данных частей конструкции.
3. Предложен подход к формированию математической модели с привязкой к конструкции трансмиссии вертолета. Показано, как нарушения в работе конструкции (дефекты вала, подшипников качения, проскальзывание тел качения, заклинивание и т.д.), вызывающие изменение в хронограммах вращения, как следствие, спектральных характеристиках, определяются с помощью математической модели на основе баланса мощности. Получение информации о дефектах циклического механизма (в том числе находящегося в стадии зарождения) определяется путем сравнения расчетной и экспериментальной хронограмм, а также спектральной обработки сигнала.
4. Доказано, что частоты фазохронометрического спектра сохраняются во времени, что обеспечивает количественное сравнение и выявление изменений в работе трансмиссии вертолета в процессе его эксплуатации.
5. Резкое увеличение амплитуды спектра в высокочастотной области при нагрузке приводит к изменению параметров спектра, появляются частоты, отражающие особенности работы редуктора в нагруженном состоянии (169,36 Гц, 336,12 Гц). Показано, что ФХМ является инструментом для оценивания динамики работы конструкции и отстройки от резонанса.

6. При внесении дисбаланса (на 0^0) на холостом ходу в системе сохраняются собственные частоты механизма (140,51 Гц, 233,68 Гц, 278,15 Гц, 327,82 Гц, 374,34 Гц, 421,21 Гц, 466,62 Гц, 514,41 Гц, 606,18 Гц, 699,32 Гц, 747,38 Гц, 840,19 Гц, 887,51 Гц, 933,56 Гц, 980,81 Гц, 1026,12 Гц, 1072,11 Гц), частоты 93,14 Гц, 187,01 Гц, 559,12 Гц и 653,24 Гц сохраняются на спектре сигнала, полученного оптической системой, установленной на выходном валу, при этом возникают две частоты (55,11 Гц, 707,03 Гц), которые ранее не проявлялись.

7. С помощью оптической системы, установленной на входном валу, при внесении дисбаланса и нагружении моментом зафиксированы дополнительные частоты 114,34 Гц, 230,17 Гц, 287,62 Гц, 345,32 Гц, 401,14 Гц, 460,05 Гц, 560,08 Гц, 828,11 Гц, а с помощью системы, установленной на выходном валу такие частоты, как 111,11 Гц, 168,14 Гц, 335,30 Гц, 391,84 Гц. Данная особенность говорит о возможности использования разработанной системы для оценки влияния дисбаланса на примере трансмиссии вертолета. Полученные данные позволяют говорить о высокой чувствительности системы даже к малым массам (0,002 %), вызывающим дисбаланс циклических механизмов.

8. Предложена и экспериментально реализована система измерения момента вращения непосредственно на валу трансмиссии с помощью измерительной фазохронометрической технологии. Сравнение экспериментальных результатов измерений, полученных штатной системой, со значениями, полученными с помощью разработанного фазохронометрического подхода, показало расхождение значений не более, чем на 1 %.

9. Произведен расчет геометрической составляющей погрешности системы, включающий учет погрешности изготовления информационных элементов и монтажа, изменения геометрии информационного элемента от температурного расширения материала. Расчетное значение погрешности измерения интервалов времени составило не более $3,3 \cdot 10^{-7}$ с.

10. Суммарная относительная погрешность измерительного канала составляет величину не более $28 \cdot 10^{-3}$ %. Показано, что основной вклад в общую погрешность измерения вносит первичный преобразователь. Для обеспечения возможности получения результата измерения с использованием фазохронометрической системы погрешность применяемых первичных преобразователей не должна превышать $1 \cdot 10^{-7}$ с.

11. Для полной реализации измерительной фазохронометрической технологии разработана и опробована методика оценки погрешности первичных преобразователей. Результаты апробации методики для трансмиссии вертолета показали, что требуемая погрешность первичных преобразователей должна быть такой, чтобы погрешность фазохронометрической технологии не превышала $5 \cdot 10^{-4}$ %.

12. Разработан проект методики выполнения измерений параметров трансмиссии вертолета на базе измерительной фазохронометрической технологии, включающей измерение крутящего момента с точностью не ниже ± 2 %; частоты вращения с точностью не ниже $\pm 1,8 \cdot 10^{-4}$ %; определение собственных частотных характеристик с точностью не ниже $\pm 0,01$ Гц; алгоритм определения частотных характеристик при влиянии дисбаланса с относительной массой не менее 0,002%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в журналах, входящих в базы Web of Science, Scopus, ВАК РФ:

1. Позднякова (Метелкина) Е.Д., Потапов К.Г. Подход к совершенствованию систем диагностики технического состояния в авиационной отрасли на базе цифровых технологий // Станкоинструмент. - 2024. - №3(036). - с. 74-78. (0,45 п.л./ 0,3 п.л.). Автором разработана методика использования фазохронометрического подхода применительно к элементам трансмиссии вертолетной техники, предложен алгоритм обработки и анализа получаемой измерительной информации.

2. Позднякова (Метелкина) Е.Д. Современная концепция реализации измерительной технологии сопровождения эксплуатации летательных аппаратов // Приборы. - 2023. - №10. - с. 40-46. (1 п.л.) Автором проведен анализ применяемых подходов к задачам диагностики конструктивных элементов трансмиссии летательного аппарата и проведена оценка экспериментальных данных, полученных с применением фазохронометрического подхода.

3. Киселев М.И., Позднякова (Метелкина) Е.Д., Комшин А.С. XIII Всероссийское совещание-семинар "Инженерно-физические проблемы новой техники" (проблемы метрологии и индустрии 4.0) // Научно-технические технологии. - 2018. - №7. - с.45-48. (0,35 п.л./0,1 п.л.). Автором произведена оценка возможности повышения уровня информационно-метрологического обеспечения жизненного цикла объектов транспортной области на примере вертолетной техники на основе прецизионного фазохронометрического метода.

4. Позднякова (Метелкина) Е.Д. и др. Транспортные системы в условиях индустрии 4.0: реальность и перспективы // Стандарты и качество. - 2018. - №7. - с.92-96. (0,35 п.л./ 0,15 п.л.) Лично соискателем проведен анализ применения вертолетной техники в транспортной структуре страны и оценены перспективы ее развития в рамках реализации индустрии 4.0.

5. Метелкина (Позднякова) Е.Д. Система диагностирования технического состояния углового редуктора // Приборы. - 2016. - №11. - с.14-21. (1 п.л.). Лично соискателем разработана методика обработки измерительной информации с целью ее дальнейшего использования для перехода к оценке текущего технического состояния углового редуктора.

6. Pozdnyakova (Metelkina) E.D. et al. Measuring control of construction materials parameters in order to increase reliability of engineering objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Volume 489). DOI:10.1088/1757-899X/489/1/012008. (0,38 п.л./0,2 п.л.). Лично соискателем проведена оценка информационной емкости существующих методов измерения в области метрологии быстрых процессов.

7. Metelkina (Pozdnyakova) E.D., Komshin A.S. The use of measuring phase-chronometric systems in the production of cyclic aggregates of aircraft // MATEC Web of Conferences Volume 129 (2017). ICMTMTE, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712901048. (0,5 п.л./0,35 п.л.). Лично соискателем разработана функциональная схема ФХМ системы для циклических агрегатов вертолетов, проведен анализ данных, полученных методами математического моделирования.

Прочие публикации:

8. Позднякова (Метелкина) Е. Д. Применение измерительных технологий в целях оптимизации функционирования и диагностики конструктивных элементов летательных аппаратов с применением волоконно-оптических систем // Двенадцатая Всерос. конф. молод. уч. и спец. (с междунар. участ.) «Будущее машиностроения России»: сборн. докл. 24–27 сентября 2019 г. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 160-162.

9. Позднякова (Метелкина) Е.Д. и др. Измерительный контроль параметров конструкционных материалов в целях повышения надежности объектов машиностроения // Юбилейная XXX Междунар. инновац. конф. молод. учен. и студент. по пробл. Машиновед.: матер. конф. / ИМАШ РАН. Москва, 2018. С. 56-59.

10. Метелкина (Позднякова) Е.Д., Комшин А.С. Применение измерительных технологий в целях оптимизации функционирования и диагностики энергетических систем и конструктивных элементов летательных аппаратов // Междунар. научн. конф. «Фундаментальные и прикладные задачи механики», М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 160-162.

11. Метелкина (Позднякова) Е.Д., Комшин А.С. Оптимизация функционирования и диагностика технических систем летательных аппаратов на базе энергоэффективных измерительных технологий // Десятая Всерос. конф. молод. уч. и спец. (с междунар. участ.) «Будущее машиностроения России»: сборн. докл. 25–28 сентября 2017 г. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 62-68.

12. Применение измерительных фазохронометрических технологий диагностики в морской индустрии / Метелкина (Позднякова) Е.Д. [и др.]. V Международный Балтийский морской форум. V Междунар. научн. конф. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тез. докл. Ч. 1. – Калининград: БГАРФ, 2017. С.166-168.

13. Метелкина (Позднякова) Е.Д. Оценка текущего технического состояния агрегатов вертолетов // XIV Всерос. научно-техн. конф. «Состояние и проблемы измерений»: материалы конференции. Москва, 2017. С.272-274.

14. Метелкина (Позднякова) Е.Д., Комшин А.С. Обеспечение эксплуатации и диагностика углового редуктора // XXVII Междунар. инновационно-ориентированная конф. молод. учен. и студ. МИКМУС: матер. конф. ИМАШ РАН. Москва, 2016. С. 42-44.

15. Метелкина (Позднякова) Е.Д. Модернизация испытательного стенда для диагностирования технического состояния углового редуктора вертолета// URL: studvesna.ru?go=articles&id=1746.