

На правах рукописи

Хабаров Станислав Сергеевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность 05.11.15- Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва, 2020

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

Научный руководитель **Комшин Александр Сергеевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бабаджанов Леон Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
Главный научный сотрудник,
ФГУП «ВНИИМС», г. Москва

Гончар Александр Викторович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем машиностроения РАН – филиал
Федерального государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»,
г. Нижний Новгород

Ведущая организация ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологии им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится _____ 2020 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Телефон для справок: 8(499)267- 09-63

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.141.18,
к.т.н., доцент



Мешков С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современном мире технологии диагностики и мониторинга текущего технического состояния сложных технических объектов являются основой инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, а также устойчивого положения России на внешнем рынке, так как они позволяют противодействовать техногенным источникам опасности.

Кроме того, создание перспективных видов техники, например, летательных аппаратов, в том числе военного назначения, неминуемо сопровождается применением новых материалов для возможности использования техники в экстремальных условиях с целью достижения конкурентных летно-технических характеристик (скорость, вес, дальность полета и др.). Это, в свою очередь, порождает необходимость разработки новых методов и средств измерения технических параметров состояния конструкций с целью обеспечения безопасной эксплуатации, что является одной из задач в рамках распоряжения Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 года N 737-р «О стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года».

Для компенсации возможного разброса и неточности исходных данных (нагрузок) используются коэффициенты надежности, обеспечивающие чрезвычайно малую вероятность появления усталостных трещин в силовых элементах конструкции при эксплуатации вертолета в пределах установленного назначенного ресурса.

Непрерывный контроль фактических нагрузок, напряжений, деформаций, действующих на агрегат конкретного вертолета в конкретный момент времени, позволит снизить применяемые коэффициенты надежности при определении расчетного (назначенного) ресурса этого агрегата, а также уточнить остаточный ресурс конструкции в ходе эксплуатации. В этом случае необходимо оснащение вертолета надежной системой измерения и записи нагрузок, деформаций на накопитель в процессе всего полета, способной выполнять свои функции на протяжении срока службы и ресурса агрегата.

Таким образом, актуальность темы научного исследования обусловлена необходимостью совершенствования научно-методических основ при создании и внедрении новых технических решений по разработке системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций сложных технических объектов, в том числе летательных аппаратов.

Существенный вклад в области измерений, контроля, оценки технического состояния и надежности сложных технических систем высоконагруженных конструкций внесли отечественные учёные: Бойцов Б.В., Булатов В.П., Ключев В.В., Мясников Ю.Н., Колесников К.С., Махутов Н.А., Леонтьев А.И., Исаев Л.К., Кустарев А.С., Заславский Л.С., Осташев В.В.,

Ерофеев В.И., Мишакин В.В., Матвиенко Ю.Г., Федкин В.К., Цапенко М.П., Разумовский И.А., Полилов А.Н., Левин С.Ф., Киселёв М.И. и др.

Цель диссертации заключается в разработке научно-методических подходов к метрологическому обеспечению системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций и создание технических средств контроля и диагностики состояния летательного аппарата на основе применения волоконно-оптической измерительной технологии.

Для достижения цели в диссертации были решены следующие задачи:

1. Обзор существующих методов контроля технического состояния высоконагруженных конструкций сложных технических объектов и анализ требований к метрологическому обеспечению системы непрерывного мониторинга высоконагруженных конструкций летательного аппарата.

2. Разработка методики совместного применения волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков для мониторинга технического состояния конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

3. Многофакторное математическое моделирование системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с оценкой адекватности разработанных математических моделей.

4. Разработка системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков и оценка её метрологических характеристик.

5. Экспериментальные исследования системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков.

Методы исследования

При проведении исследований был использован математический аппарат прикладной метрологии в сочетании с методами цифровой обработки акустических сигналов, сопротивления материалов, математического и конечно-элементного моделирования.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и в производственных условиях организаций ООО НИЦ «ИРТ», филиала ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» и АО «НЦВ Миль и Камов». При обработке результатов экспериментальных исследований использовались методы спектрального анализа и методы теории обработки результатов многократных измерений, отвечающие требованиям нормативов прикладной метрологии.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработан научно-методический подход к метрологическому обеспечению системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций летательного аппарата.

2. Впервые разработана методика совместного применения волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков для контроля и диагностики технического состояния конструкций из ПКМ.

3. Предложена многофакторная математическая модель, учитывающая влияние внешних воздействующих факторов (температура) на волоконно-оптический датчик деформации, с целью повышения точности измерения.

4. Впервые предложен подход к измерению параметров деформации с выделением временных участков, соответствующих интервалам температур с характерными для них значениями параметров функции ползучести.

Достоверность результатов основывается на использовании аттестованных и поверенных средств измерения при проведении лабораторных и стендовых испытаний, и обеспечивается согласованием результатов экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов и математического моделирования, верификацией и идентификацией применяемых математических моделей.

Практическая значимость работы:

1. На базе полученных результатов в рамках диссертации разработана методика непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций из ПКМ летательного аппарата, на основе применения волоконно-оптической измерительной технологии, что подтверждается актом № 15/19 от 25 сентября 2019 г. Использование системы мониторинга, основанной на данной технологии, позволит непрерывно получать объективную информацию о техническом состоянии высоконагруженных конструкций и своевременно обнаруживать эксплуатационные повреждения, что даст возможность уменьшить время проведения неразрушающего контроля конструкций из ПКМ более чем в 10 раз.

2. Результаты научного исследования в рамках диссертации использовались при разработке бортовой системы контроля технического состояния силовых элементов и конструкций вертолета Ка-52, которая позволяет прогнозировать возможность увеличения ресурса агрегатов вертолета, что подтверждается актом от 29 сентября 2020 г.

Результаты диссертации легли в основу методики поверки волоконно-оптических датчиков деформации, которые внесены в государственный реестр средств измерения (сертификат RU.C.27.010.A №58645).

Результаты диссертации поддержаны в рамках следующих проектов, в которых автор являлся непосредственным исполнителем:

1. Проект, шифр «Хрусталь» по договору № 5/044/2015-2017 от 28 июля 2015 г. между ФПИ и ООО НИЦ «ИРТ» по теме «Разработка комплексной системы раннего обнаружения повреждений критических элементов конструкций перспективной военной техники».

2. НИР, шифр «Невод-2», ГК № 1618187240102452466001574 от 16 сентября 2016 г. между Минобороны России и ООО НИЦ «ИРТ» по теме «Исследования по созданию активной системы встроенной диагностики и самозалечивания повреждений гибридных конструкций военной техники на основе комплексного применения акустических волоконно-оптических датчиков».

3. Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки по теме «Разработка системы регистрации срывных явлений на лопастях несущего винта вертолета в процессе полета и контроля технического состояния автомата перекоса» в рамках Соглашения с Минобрнауки России о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. №14.579.21.0150.

4. СЧ ОКР, шифр «Авангард-4/БСК-52», по контракту № 1922187320321452208002620/1-Ка от 2 февраля 2020 г. между АО «Камов» и ООО НИЦ «ИРТ» по теме «Разработка бортовой системы контроля технического состояния силовых элементов и конструкций вертолета».

Апробация работы

Вошедшие в диссертацию результаты докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

- II Всероссийская научно-техническая конференция «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов» (13–14 марта 2018 года, г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА»);

- IV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях» (28-29 ноября 2018г., г. Люберцы, МО);

- Международный военно-технический форум «Армия-2018», 21 - 26.08.2018 г. п. Нахабино (МО);

- 11-я и 12-я международная выставка вертолетной индустрии HeliRussia 2018-2019, г. Москва 2018, 2019 г.;

- XII Всероссийская конференция молодых ученых «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2019 г.;

- XIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвящённая 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора Киселёва М. И., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2020 г.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Научно-методический подход к метрологическому обеспечению непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций летательного аппарата.

2. Методика совместного применения волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков для контроля и диагностики технического состояния конструкций из ПКМ.

3. Многофакторная математическая модель, учитывающая влияние внешних воздействующих факторов (температура) на волоконно-оптический датчик деформации, для повышения точности измерения.

4. Подход к измерению параметров деформации с выделением временных участков, соответствующих интервалам температур с характерными для них значениями параметров функции ползучести.

Основные результаты диссертации получены автором лично, либо при его определяющем участии. Автором проведен анализ научной литературы по тематике диссертационной работы, спланированы эксперименты, проведена обработка измерительной информации.

По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, общим объемом 1,90 п.л., 5 патентах РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из списка сокращений и обозначений, введения, 5 глав, общих выводов и заключения по диссертации, списка литературы из 101 наименований, приложения. Содержит 129 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено её содержание, указаны основные положения, выносимые на защиту, выделена научная новизна и практическая ценность работы.

В Главе 1 приведены результаты анализа существующих методов контроля технического состояния высоконагруженных конструкций сложных технических объектов на примере авиационной техники.

Согласно научным трудам Н.А. Махутова, техническое состояние сложных технических объектов может быть описано как трехмерная функция (поверхность), определяемая показателями эксплуатационной нагруженности (усилие, деформация, напряжение), температурно-временными и ресурсными показателями, а также показателями живучести конструкции (размеры повреждений и скорость их роста). При этом, для обеспечения безопасной эксплуатации технического объекта (например, летательного аппарата) с целью недопущения достижения предельных состояний, а также в связи с большим разбросом величин действующих на конструкцию нагрузок, на этапе проектирования конструкций и их испытаний назначаются запасы по прочности, ресурсу и живучести, что снижает тактико-технические

характеристики летательного аппарата в части максимальной скорости, взлетного веса и прочее.

Таким образом, с целью обеспечения безопасной эксплуатации летательного аппарата и повышения его тактико-технических характеристик сформулирована необходимость применения методов и средств непрерывного мониторинга и диагностики технического состояния высоконагруженных конструкций летательного аппарата, включающие методы измерения напряжённо-деформированного состояния (НДС) и определения параметров повреждений, возникающих в ходе эксплуатации.

По результатам анализа существующих методов измерения НДС и методов обнаружения дефектов в конструкциях выявлены присущие им преимущества и недостатки.

Для создания системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций авиационной техники наиболее предпочтительным является совместное использование двух методов: тензометрический и акусто-эмиссионный (АЭ) методы в связи с:

- 1) возможностью использования АЭ метода для обнаружения в режиме реального времени дефектов на ранней стадии их возникновения и регистрации ударных воздействий на конструкции большой площади;
- 2) распространённостью тензометрического метода и возможностью его использования на борту летательного аппарата в процессе полета.

Также в данной главе приведены требования к метрологическому обеспечению системы непрерывного мониторинга высоконагруженных конструкций летательного аппарата, включая следующие требования:

- диапазон измерения деформации для конструкций из ПКМ должен составлять от минус 3000 до 5 000 мкм/м, а для конструкций из стали от минус 3 000 до 3 000 мкм/м;
- допустимая погрешность измерения деформации $\Delta \epsilon$ должна быть не более ± 47 мкм/м при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от минус 65 до 85 °С;
- регистрация ударных воздействий на конструкцию из ПКМ должна осуществляться в диапазоне от 1 до 100 Дж;
- относительная погрешность измерения ударного воздействия должна составлять не более 10 %.

По результатам анализа данных требований для непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций предложено использовать волоконно-оптические датчики деформации (ВОТД) на основе брэгговской решетки и волоконно-оптические акустические датчики (ВОДАЭ) на основе интерферометра Фабри-Перо, отличающихся повышенной надежностью, простым мультиплексированием (до 16 датчиков на один измерительный канал), миниатюрностью (диаметр чувствительного элемента 0,125 мм) и высокой чувствительностью (1 мкм/м).

В Главе 2 приводятся материалы разработки методики совместного применения ВОТД и ВОДАЭ для мониторинга технического состояния конструкций из ПКМ, которая позволит увеличить назначенный ресурс конструкций из ПКМ на 20 %.

В связи с тем, что в настоящее время при проектировании конструкций летательного аппарата все чаще используются ПКМ, то крайне важным является своевременное обнаружение скрытых повреждений, таких как расслоение, которое, в основном, возникает после ударного воздействия на конструкцию во время эксплуатации.

Методика совместного применения ВОТД и ВОДАЭ заключается в следующем:

- 1) на этапе проектирования конструкции из ПКМ (или для уже существующей конструкции) создается конечно-элементная модель (КЭМ) конструктивно-подобного образца (КПО), соответствующего высокоответственной и высоконагруженной зоне контролируемой конструкции;
- 2) изготавливается серия КПО и проводятся стендовые испытания с целью определения прочностных и ресурсных показателей КПО;
- 3) по результатам стендовых испытаний проводится верификация КЭМ;
- 4) с помощью КЭМ моделируются ударные воздействия на различные участки КПО с энергиями ударов, соответствующих различным категориям повреждений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации;
- 5) по результатам моделирования ударных воздействий с помощью КЭМ определяются размеры возникающих повреждений;
- 6) с помощью КЭМ определяются прочностные показатели поврежденного и неповрежденного КПО;
- 7) на этапе эксплуатации с помощью ВОТД и ВОДАЭ, установленных на контролируемую конструкцию, осуществляется непрерывное измерение параметров НДС, параметров ударного воздействия на конструкцию (энергия и место удара), и в случае превышения пороговых значений по измеряемым параметрам производится технический осмотр с применением методов неразрушающего контроля для оценки истинных размеров дефектов;
- 8) при возникновении ударного воздействия на конструкцию, зарегистрированного с помощью ВОДАЭ производится сравнение с результатами КЭМ по параметрам прочности, и в случае, если остаточная прочность поврежденного КПО больше порогового значения (например, прочность, соответствующая максимальной эксплуатационной нагрузке), то рассчитывается повреждаемость конструкции на основе данных с ВОТД;
- 9) на основе полученной повреждаемости конструкции рассчитывается остаточный ресурс конструкции.

Стоит отметить, что использование КЭМ в представленной методике обусловливается необходимостью уменьшения затрат на проведение стендовых испытаний для получения базы данных по ударным повреждениям и соответствующей им остаточной прочности и ресурсу образцов. В случае использования КЭМ, испытаниям подвергается только часть образцов для её верификации.

Также в данной главе представлены результаты конечно-элементного моделирования конструкции летательного аппарата из ПКМ и результаты её верификации, а также алгоритм обработки данных с ВОТД и ВОДАЭ с целью определения остаточного ресурса конструкции.

В Главе 3 приводятся результаты многофакторного математического моделирования системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с учетом влияния изменения температуры окружающей среды и длительности воздействия на ВОТД различных видов нагрузки при измерении параметров НДС конструкции.

Известно, что при воздействии температуры и деформации на волоконную брэгговскую решетку (ВБР), как чувствительного элемента ВОТД, изменяется центральная длина волны отраженного спектра оптического излучения. При этом, функция изменения центральной длины волны ВБР, установленная на контролируруемую конструкцию, может быть представлена следующим выражением:

$$\Delta\lambda = \lambda_{B0} * (1 - p_e) * k * \varepsilon + \lambda_{B0} * (\alpha + \beta) * \eta * \Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda$ - изменение центральной длины волны ВБР от воздействия деформации и температуры относительно λ_{B0} ; λ_{B0} - длина волны ВБР при отсутствии на неё деформации и при фиксированной температуре; p_e - эмпирическая эффективная упругооптическая постоянная, зависящая от показателя преломления сердцевины волокна и компонентов упругооптического тензора; k - коэффициент передачи деформации от конструкции к ВБР; ε - деформация конструкции от внешней нагрузки и температуры; α - коэффициент температурного линейного расширения оптического волокна; β - термооптический коэффициент; η - коэффициент передачи температуры от конструкции к ВБР; ΔT - изменение температуры относительно фиксированного значения.

Для осуществления температурной компенсации при измерении деформации с помощью ВБР были рассмотрены следующие методы:

1) использование температурного датчика, представляющего собой ВБР, изолированной от действия внешней деформации, при измерении деформации растяжения/сжатия;

2) использование математического вычитания и сложения функций длин волн двух ВБР при измерении деформации изгиба.

В соответствии с двумя методами температурной компенсации на основании выражения (1) были выведены формулы для расчета температуры и деформации контролируемого объекта от воздействия внешней нагрузки (ϵ_H):

- для измерения деформации растяжения/сжатия:

$$\epsilon_H = \frac{1}{k * (1 - p_e)} * \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B10}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}} \right) - \gamma * \frac{1}{\eta * (\alpha + \beta)} * \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}}, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{1}{\eta * (\alpha + \beta)} * \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}}, \quad (3)$$

где γ - коэффициент температурного линейного расширения конструкции;

- для измерения деформации изгиба:

$$\epsilon_H = \frac{1}{2} * \frac{1}{k * (1 - p_e)} * \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B10}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}} \right), \quad (4)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} * \frac{1}{\eta * (\alpha + \beta)} * \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B10}} + \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}} \right). \quad (5)$$

В связи с тем, что для установки ВОТД на контролируемую конструкцию используется клей, и зачастую температура стеклования клея ниже температуры эксплуатации ВОТД, то при длительных измерениях деформации возникает ползучесть клеевого соединения, которая может существенно влиять на результаты измерения деформации.

По результатам анализа методов оценки ползучести электрических тензорезисторов, приведенных в книге Н.П. Клоковой «Тензорезисторы», были разработаны математические модели измерения деформации ϵ_τ изгиба и растяжения - сжатия конструкции с помощью ВОТД с учетом ползучести клеевого соединения, которые могут быть представлены следующими выражениями:

- для измерения деформации изгиба:

$$\epsilon_\tau = \frac{1}{2} * k_1 * \left(1 + P_e * \left(e^{-\frac{\tau}{a_1}} - 1 \right) + \left(e^{-\frac{\tau}{a_2}} - 1 \right) \right) * \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B10}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}} \right); \quad (6)$$

- для измерения деформации растяжения – сжатия:

$$\epsilon_\tau = k_1 * \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B10}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}} \right) * \left(1 + P_e * \left(e^{-\frac{\tau}{a_1}} - 1 \right) + \left(e^{-\frac{\tau}{a_2}} - 1 \right) \right) - (k_1 + \gamma * \alpha_1) * \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B20}}. \quad (7)$$

При этом $k_1 = \frac{1}{k * (1 - p_e)}$ - обобщенный калибровочный коэффициент передачи деформации от конструкции первой ВБР;

$\alpha_1 = \frac{1}{\eta * (\alpha + \beta)}$ - обобщенный калибровочный коэффициент передачи температуры конструкции второй ВБР;

P_e - условное предельное значение ползучести при заданной температуре; τ - время воздействия нагрузки и температуры на датчик;

a_1, a_2 – эмпирические постоянные времени ползучести при заданной температуре.

Так как коэффициенты P_e , a_1 и a_2 зависят от температуры, а в процессе эксплуатации температура окружающей среды может изменяться в широком диапазоне, на графике измеренной деформации необходимо выделять временные участки, соответствующие определенным температурным диапазонам, с характерными для них коэффициентами функции ползучести. При этом значения температуры могут определяться по тем же датчикам ВОТД в соответствии с выражениями (3) и (5).

Обобщенная математическая модель деформации имеет вид:

$$\varepsilon(\tau, \Theta) = F(\lambda) * (1 + P_e * A_1(\tau, \Theta) + A_2(\tau, \Theta)), \quad (8)$$

где $F(\lambda)$ – функция измерения деформации, зависящая от длин волн ВБР, входящих в состав ВОТД с применением калибровочных коэффициентов, определенных при нормальных условиях;

$A_1(\tau, \Theta)$ – функция кратковременной ползучести, зависящая от времени и температуры;

$A_2(\tau, \Theta)$ – функция длительной ползучести вертикального направления, зависящая от времени и температуры.

Полученная математическая модель позволяет рассматривать множество видов нагруженных объектов и обеспечивает повышение точности моделирования, а также учет влияния температурного режима на результаты испытаний.

Для оценки адекватности разработанной математической модели компенсации температурной ползучести ВОТД была проведена серия экспериментов с использованием экспериментальной установки в виде балки равной деформации из стали 30ХГСА с наклеенными ВОТД производства ООО НИЦ «ИРТ» с помощью эпоксидного клея ВК-27.

Определение коэффициентов аппроксимирующей экспоненциальной функции ползучести осуществлялось методом наименьших квадратов по результатам проведения температурных экспериментов на экспериментальной установке в соответствии с методикой, представленной в данной главе.

Результаты определения параметров аппроксимирующей функции при различных температурах представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры аппроксимирующей функции при различных температурах

№	Температура, °С	Начальная деформация, мкм/м	P_e , %	a_1	a_2	Средняя ошибка аппроксимации, %
1	2	3	4	5	6	7
1	40	2 000	-0,0011	16	3757200	4,04
2	50	2 000	-0,0151	34	303000	2,37
3	85	2 000	-0,0102	29	5000000	1,93

Средняя ошибка аппроксимации (\bar{A}) ползучести определяется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Pi_{ti}^{изм} - \Pi_{ti}^{расч}}{\Pi_{ti}^{изм}} \right| * 100\%, \quad (9)$$

где n – количество точек измерения; i – момент времени измерения ползучести; $\Pi_{ti}^{расч}$ – значение ползучести, полученное с помощью аппроксимирующей функции; $\Pi_{ti}^{изм}$ – измеренное значение ползучести.

Как видно из Таблицы 1 максимальная средняя ошибка аппроксимации ползучести составила не более 4,04 %, что свидетельствует о достаточно правильно подобранной функции для аппроксимации ползучести.

По результатам проведения экспериментов установлено, что при использовании разработанной математической модели компенсации ползучести ВОТД с учетом применения подхода по разделению измеренной деформации на временные участки в зависимости от действующей температуры, максимальная основная погрешность измерения ВОТД за 160 минут уменьшилась более чем на 10 мкм/м (Рисунок 1).

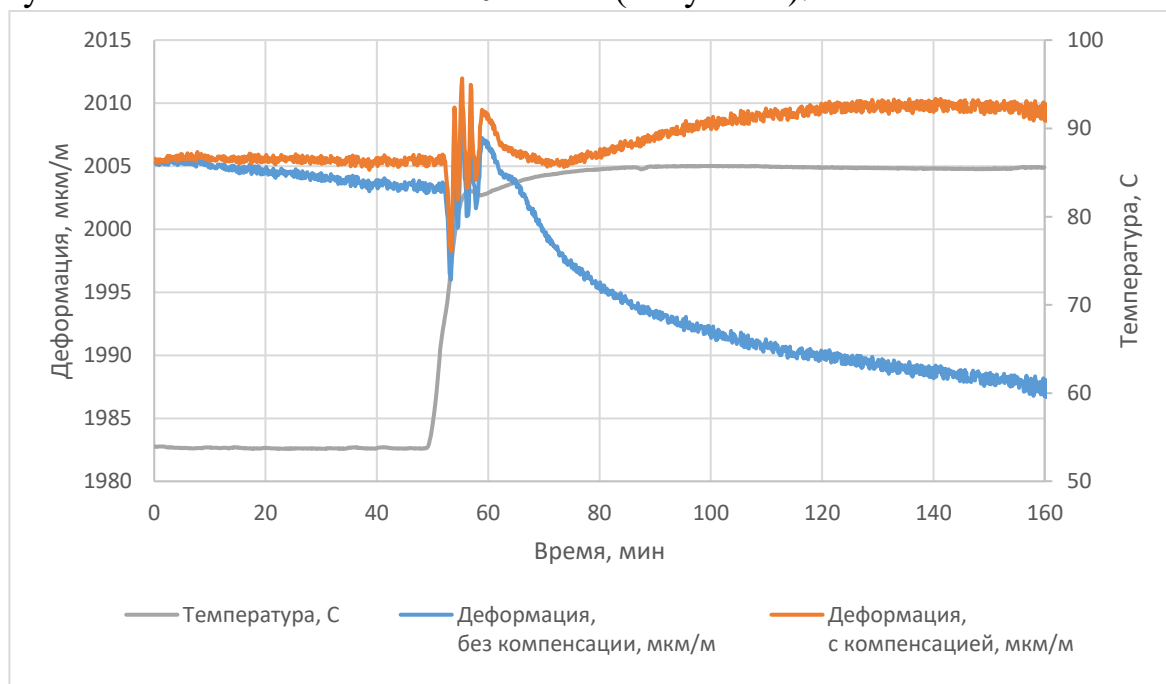


Рисунок 1. Измерение деформации ВОТД с и без использования математической модели компенсации ползучести

Для регистрации ударных воздействий на конструкцию из ПКМ в данной главе приведены математические модели измерения местоположения и энергии ударного воздействия с помощью ВОДАЭ на основе интерферометра Фабри-Перо.

В Главе 4 приведены результаты разработки системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков.

Функциональная схема разработанной системы представлена на Рисунке 2.

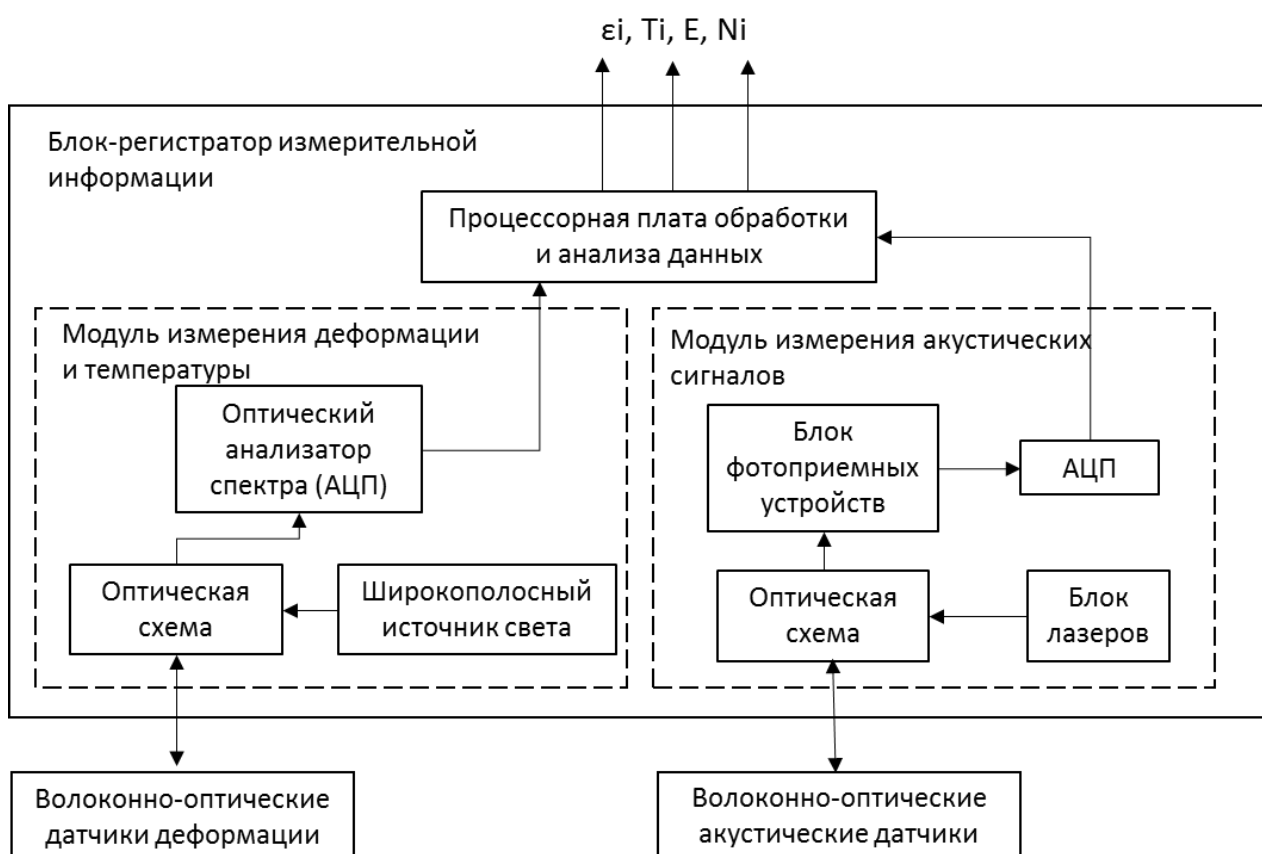


Рисунок 2. Функциональная схема системы непрерывного мониторинга

В состав системы помимо ВОТД и ВОДАЭ входит блок-регистратор измерительной информации (БР), содержащий модуль измерения деформации и температуры, выполненный по схеме с использованием спектрометра, и модуль измерения акустических сигналов, выполненный по оптической когерентной схеме с квадратурным каналом.

После генерации оптического излучения широкополосным непрерывным источником света типа SLD и передачи его в ВОТД, с последнего через оптическую схему поступает оптический аналоговый сигнал в анализатор спектра типа I-mon, где сигнал оцифровывается с частотой дискретизации порядка 500 Гц. После чего осуществляется расчет центральных длин волн ВБР с последующей передачей цифрового сигнала в процессорную плату обработки и анализа данных. В последней по установленным формулам производится расчет деформации ϵ_i и температуры T_i контролируемой конструкции, для последующего расчета усталостной повреждаемости и расчета остаточного ресурса конструкции.

Параллельно с этим в блоке лазеров модуля измерения акустических сигналов происходит генерация двух оптических излучений с длинами волн λ_1 и λ_2 и передача их через оптическую схему в ВОДАЭ и блок фотоприемных устройств. Полученный интерференционный сигнал от отраженного сигнала с

датчика и блока лазеров передается в плату АЦП для его оцифровки и расчета амплитуды сигнала с частотой дискретизации порядка 500 кГц. После передачи данных в процессорную плату производится расчет энергии ударного воздействия E , определение его местоположения.

Также в данной главе приведены результаты оценки метрологических характеристик разработанной системы по каналу измерения деформации.

Суммарная погрешность измерительного канала измерения деформации рассчитывалась согласно РМГ 62-2003 путем оценки границы абсолютной погрешности измерений $\Delta_{\text{деф}}$:

$$\Delta_{\text{деф}} = K * \sqrt{\Delta_{\text{спектр}}^2 + \Delta_{\text{ВОТД}}^2}, \quad (10)$$

где $K=1,2$ для оценок границ погрешности измерений наиболее важных параметров, $\Delta_{\text{спектр}}$ – абсолютная погрешность измерения деформации спектрометром, $\Delta_{\text{ВОТД}}$ – абсолютная погрешность измерения деформации с помощью ВОТД.

По результатам оценки метрологических характеристик разработанной системы мониторинга технического состояния по каналу измерения деформации граница абсолютной погрешности измерения деформации составила не более 37 мкм/м, что меньше допустимой погрешности, определенной в первой главе, более чем на 20 %.

Для подтверждения метрологических характеристик разработанной системы были осуществлены эксперименты, результаты которых представлены в пятой главе.

В Главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований разработанной системы при проведении стендовых испытаний, включающие статические и ресурсные испытания конструктивно-подобных образцов (КПО) конструкции летательных аппаратов, представляющих собой плоские образцы из углепластика и алюминиевых сотовых элементов.

По результатам экспериментальных исследований, включающие стендовые испытания на балке равной деформации, летные испытания в составе вертолета типа Ми-24 и стендовые испытания КПО из ПКМ на ударные воздействия, статическое и циклическое растяжение, было установлено, что система отвечает требованиям к метрологическому обеспечению, установленным в первой главе, а именно:

1. Диапазон измерения деформации с помощью ВОТД, наклеенных на металлические конструкции, составляет от минус 3000 до 3000 мкм/м, а для конструкций из ПКМ – не менее 5 000 мкм/м;
2. Абсолютная погрешность измерения деформации составляет не более ± 37 мкм/м с учетом компенсации ползучести клеевого слоя, в том числе при воздействии повышенной температуры;
3. Диапазон измерения энергии ударного воздействия составляет от 1 до 100 Дж;

4. Относительная погрешность измерения энергии ударного воздействия составляет не более 10 %.

5. Ресурс волоконно-оптических датчиков сопоставим с ресурсом контролируемых конструкций из ПКМ при проведении усталостных испытаний.

По результатам экспериментальных исследований разработана методика поверки канала измерения деформации разработанной системы, которая впоследствии использовалась при сертификации системы как средства измерения (сертификат RU.C.27.010.A №58645).

В соответствии с МИ 187-86 и МИ 188-86 установлены показатели методики поверки, обеспечивающие достоверность поверки при заданных и определяемых критериях достоверности (допускаемое значение вероятности ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра СИ - $\{P_{\text{bam}}\}_p=0,5$; отношение наибольшего возможного модуля контролируемой характеристики погрешности экземпляра СИ, который может быть ошибочно признан годным, к пределу её допускаемых значений - $\{(\delta_m)_{\text{ba}}\}_p=1,25$; наибольшая средняя для совокупности годных экземпляров СИ вероятность ошибочного признания дефектным в действительности годных экземпляров СИ $(P_{\text{gr}})_{\text{mg}}=0,03$).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа существующих методов и подходов, используемых для оценки технического состояния конструкций авиационной техники, а также требований, предъявляемых к бортовым системам, входящих в состав летательного аппарата, сформулированы требования к метрологическому обеспечению непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций летательного аппарата. В качестве методов непрерывного мониторинга выбран метод измерения параметров напряженно-деформированного состояния и метод акустической эмиссии с возможностью регистрации ударных воздействий. В основе данных методов лежит использование волоконно-оптической измерительной технологии, отличающейся высокой надежностью и чувствительностью.

2. Разработана методика совместного применения волоконно-оптических датчиков деформации и волоконно-оптических акустических датчиков для мониторинга технического состояния конструкций из ПКМ, позволяющая оценивать остаточную прочность и ресурс конструкции из ПКМ. Разработанная методика позволяет увеличить назначенный ресурс контролируемых металлических конструкций не менее, чем на 10 %, а конструкций из ПКМ не менее, чем на 20 %.

3. Разработаны математические модели системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций с использованием волоконно-оптических датчиков деформации, учитывающие влияние изменения температуры окружающей среды и длительности воздействия на ВОТД различных видов нагрузки при измерении параметров НДС конструкции. Разработанные модели позволяют уменьшить абсолютную

погрешность измерения деформации более чем на 10 мкм/м за счет учета ползучести клеевого слоя.

4. Сформулирован подход к измерению параметров деформации с выделением временных участков, соответствующих интервалам температур с характерными для них значениями параметров функции ползучести.

5. Разработаны математические модели регистрации ударных воздействий с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии, позволяющие регистрировать ударные воздействия на конструкцию из ПКМ в диапазоне от 1 до 100 Дж.

6. Разработана система непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций летательного аппарата на основе применения волоконно-оптической измерительной технологии. Система включает в себя волоконно-оптические датчики деформации на основе волоконных брэгговских решеток, волоконно-оптические акустические датчики на основе интерферометра Фабри-Перо, а также блок-регистратор измерительной информации, устанавливаемый на борту летательного аппарата.

7. Проведена оценка метрологических характеристик разработанной системы непрерывного мониторинга технического состояния высоконагруженных конструкций. Так, диапазон измерения деформации с помощью ВОТД, наклеенных на металлические конструкции, составляет от минус 3000 до 3000 мкм/м, а для конструкций из ПКМ – не менее 5 000 мкм/м; абсолютная погрешность измерения деформации составляет не более 37 мкм/м с учетом компенсации ползучести клеевого слоя, в том числе при воздействии повышенной температуры; диапазон измерения энергии ударного воздействия составляет от 1 до 100 Дж; относительная погрешность измерения энергии ударного воздействия составляет не более 10 %.

8. Подтверждена работоспособность волоконно-оптических датчиков деформации и акустической эмиссии при многоцикловых циклических испытаниях КПО, вплоть до разрушения образцов, что говорит о том, что ресурс датчиков сопоставим с ресурсом контролируемых конструкций из ПКМ.

9. Разработанная волоконно-оптическая измерительная технология позволяет проводить непрерывный мониторинг технического состояния различных технических объектов промышленности, включая тяжелое машиностроение, транспортное машиностроение и энергетику.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Versions of Fiber-Optic Sensors for Monitoring the Technical Condition of Aircraft Structures / S. Khabarov [et al.] // Civil Engineering Journal. 2018. V. 4. №. 12. P. 2895-2902. (0,55 п.л. / 0,45 п.л.).

2. Lvov N. L., Khabarov S.S., Gavrikov M. Yu. Creation of an integrated system for monitoring the technical condition of high-quality helicopter units based

on fiber-optic technology //International Journal of Engineering &Technology. 2018. V. 7. №. 4.38. P. 1162-1166. (0,55п.л. / 0,45 п.л.).

3. Research of data Processing algorithms from fiber optic sensors / S. Khabarov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. ISSN 2278-3075. Volume-9. Issue-1S. P. 456-461. (0,45п.л. / 0,35 п.л.).

4. Algorithm for assessing the technical condition of aircraft structures using a control system on fiber optic sensors / S. Khabarov [et al.] // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering (IJATCSE). 2019. Vol.8. No 5. P. 2586-2590. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

5. Хабаров С.С. Актуальность применения волоконно-оптической технологии для мониторинга технического состояния конструкций летательных аппаратов // Инженерно-физические проблемы новой техники.: Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвящённой 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора Киселёва М.И. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 169-172 (0,25 п.л. / 0,25 п.л.).

6. Комшин А. С., Позднякова Е. Д., Хабаров С. С. Применение измерительных технологий в целях оптимизации функционирования и диагностики конструктивных элементов летательных аппаратов с применением волоконно-оптических систем // Будущее машиностроения России.: Сборник докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 160-162. (0,15 п.л./0,05 п.л.).

7. Устройство для индикации срыва потока и флаттера и контроля технического состояния автомата перекоса вертолета: пат. RU 2693762С1 РФ / Н.Л. Львов, С.С. Хабаров, М.Ю. Гавриков; заявл. 30.08.2018; опубл. 04.07.2019. Бюл. №19.

8. Устройство для индикации срыва потока на лопастях несущего винта вертолета: пат. RU 2555258С1 РФ / Н.Л. Львов, С.С. Хабаров, А.А. Носов, Н.С. Павленко; заявл. 04.03.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.

9. Система контроля технического состояния конструкций летательного аппарата (варианты): пат. RU 2544028 С1 РФ / Н.Л. Львов, С.С. Хабаров, А.А. Носов, Д.А. Сиваков; заявл. 29.07.2013; опубл. 10.03.2015. Бюлл. № 7.

10. Защитные покрытия места установки датчика на поверхности конструкции: пат. RU 181835U1 РФ / Н.Л. Львов, С.С. Хабаров, М.Ю. Гавриков, М.Ю. Федотов; заявл. 14.09.2017; опубл. 26.07.2018. Бюл. № 21.

11. Устройство выхода волоконно-оптического датчика из композита: пат. RU 179119U1 РФ / Н.Л. Львов, С.С. Хабаров, М.Ю. Гавриков, М.Ю. Федотов; заявл. 14.09.2017; опубл. 26.04.2018. Бюл. № 12.