

На правах рукописи

Комшин Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Комшин', is written over a horizontal line.

Москва, 2017

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 консультант:

Киселёв Михаил Иванович
Заслуженный работник ВШ РФ,
д. ф.- м.н., профессор

Официальные оппоненты:

Сергеев Алексей Георгиевич
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Управление качеством и
техническое регулирование» Владимирского
государственного университета (г. Владимир)

Золотаревский Юрий Михайлович
Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе
ФГУП «ВНИИОФИ» (г. Москва)

Ерофеев Владимир Иванович
доктор физико-математических наук,
профессор, Директор Института проблем
машиностроения РАН – филиала ФГБНУ
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний
Новгород)

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский Научно-исследовательский институт метрологической службы» - ВНИИМС

Защита диссертации состоится «___» _____ 2017 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Желающие присутствовать на защите диссертации должны заблаговременно известить совет письмами заинтересованных организаций на имя председателя совета. Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д.212.141.18
д.т.н., профессор

Ю.Б. Цветков

Актуальность темы

Промышленные технологии XXI века представляют собой симбиоз задач различных направлений и отраслей, сочетают в себе элементы прецизионных промышленных решений в области обработки материалов, информационных технологий, элементов полной автоматизации вплоть до создания безлюдных производств, наноэлектроники и наноматериалов, нейронных сетей и самоорганизации в части реализации индустриальных промышленных систем.

Широкое внедрение в практику получило многофакторное математическое моделирование в различных отраслях промышленности как для расчетов экономических показателей предприятий и оценки рисков, так и для оценки технического состояния систем, повышения энергоэффективности, прогнозирования состояния.

Повышенное внимание уделяется вопросам самоорганизации систем и нейронных сетей в областях обеспечения безопасности технических объектов и предотвращения техногенных катастроф, авиационной и космической техники, экономики и управления массовым сознанием.

В современную производственную сферу постепенно внедряются передовые достижения из различных отраслей. Описанные направления, являющиеся, по сути, элементами шестого технологического уклада, сочетают в себе области приборостроения и машиностроения, вопросы повышения энергоэффективности, внедрения информационных измерительных систем, непрерывного мониторинга, диагностики и обеспечения безопасности образуют более сложные межотраслевые системы, междисциплинарные направления, в основе своей построенные на процессах самоорганизации, характерных для живой природы и объектах биосферы.

На этом фоне инженерные решения в машиностроении должны представлять интеллектуальные информационные измерительные системы, включающие в себя передовые решения из областей создания новых материалов, приборостроения, анализа данных, систем управления, реализации безлюдных технологий.

С другой стороны, применяемые на действующих объектах машиностроения в энергетике, машиностроении, на транспорте системы измерений и аварийной защиты не обеспечивают решения возникших представленного комплекса задач. Задача надёжного измерения и прогноза технического состояния, обеспечения безопасности, аварийной защиты и снижения рисков технических объектов становятся проблемой национального масштаба. Эти обстоятельства предъявляют качественно новые требования к метрологическому обеспечению производства и эксплуатации промышленной продукции.

В условиях недостатка финансирования, сокращения расходов, а также ограниченных производственных мощностей промышленности в областях тяжелого машиностроения, станкостроения, энергетического и транспортного машиностроения, в тех областях, где износ основных фондов происходит значительно быстрее, чем их замена новыми (или модернизация) возникают дополнительные трудности обеспечения эксплуатации и поддержки жизненного цикла. Требуются не просто средства контроля и измерения параметров функционирования, диагностики и оценки технического состояния, а необходимо применение интеллектуальных измерительных систем, построенных по единой информационной технологии с применением на всех этапах адаптивного многофакторного математического моделирования.

Не менее важной является задача обеспечения безопасности и создания технологий предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Последствия крупных аварий и техногенных катастроф сопоставимы с последствиями военных действий. По данным различных источников в зонах потенциально опасных в случае возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций в нашей стране проживает около 55% населения.

В России по данным источников, включая Федеральную службу государственной статистики, общий износ основных фондов на 2015 г. составляет 49,4%. Вместе с тем, износ подвижного состава железных дорог России 74%, в области добычи полезных ископаемых на уровне 55,8%. Износ в отраслях производства и распределения электроэнергии, газа и воды – 47,3%. В угледобывающей отрасли износ фондов составляет 65%. В отраслях транспорта и связи 58,3%, а в развивающейся и являющейся по сути «локомотивом» российской экономики отрасли нефтепереработки износ оборудования составляет 52%.

Таким образом, задача инновационного развития промышленности в рамках шестого технологического уклада сопровождается необходимостью эффективного сопровождения потенциально опасных объектов до полной замены изношенного оборудования новым, по единой информационной измерительной технологии.

В то же самое время стоящие перед промышленностью глобальные задачи не могут быть эффективно реализованы без обеспечения точности, разработки новых методов и средств измерений, решении научно-методических проблем для обеспечения единства измерений. По сути, речь должна идти о разработке и реализации принципиально новых, построенных на достижениях фундаментальной отечественной науки с внедрением адаптируемых многофакторных математических моделей, измерительных информационных технологий с применением новых подходов. Одним из таких методов может стать фазохронометрия.

Обязательным элементом рассматриваемого фундаментального подхода является внедрение в жизненный цикл адаптируемых и уточняемых в процессе функционирования многофакторных математических моделей исследуемого объекта. Основной задачей математического моделирования в измерительной фазохронометрической технологии является установление взаимосвязи результатов эксперимента с параметрами конструкции изучаемого объекта и условиями его работы, имитация возможных нештатных режимов работы, дефектов, проведение вычислительных экспериментов аварийных режимов, которые невозможно реализовать экспериментально.

Разработка научных основ, единой концепции, измерительно-вычислительной измерительной технологии, включая требования к ее элементам, таким, как использование достижений в области развития эталонной базы, многофакторного математического моделирования и прогнозирования технического состояния может послужить базой для создания новых технических и технологических решений в целях реализации приоритетных направлений развития страны.

Целью работы является разработка научных основ и создание измерительно-вычислительных технологий сопровождения жизненного цикла объектов машиностроения с применением фазохронометрического подхода и реализация единой концепции их метрологического обеспечения.

Объект исследования: методы и средства измерительно-вычислительных технологий и информационно-метрологического сопровождения объектов машиностроения.

Предметная область исследования: информационное метрологическое обеспечение этапов жизненного цикла объектов машиностроения.

Достоверность результатов работы основывается на привязке хронометрических методик к Государственным поверочным схемам средств измерений времени и частоты, верификации и идентификации применяемых математических моделей функционирующих объектов в фазохронометрическом представлении.

Результаты работы подтверждены опытной эксплуатацией на промышленных предприятиях РФ: ЗАО «Уралэнерго-Союз» (г. Екатеринбург), АО «НИИП им. В.В. Тихомирова» (Моск. обл., г. Жуковский), АО «ЦКБМ» (г. Санкт-Петербург), АО «ЭЛАРА» (г. Чебоксары, Чувашская Республика).

Научная новизна:

1. Разработаны основные положения и научные основы Единой фазохронометрической технологии поддержки жизненного цикла объектов машиностроения: электрогенераторов, турбоагрегатов (ТА), гидроагрегатов (ГА), металлорежущих станков, редукторов; подшипников качения.

2. Разработана Единая концепция измерительно-вычислительного мониторинга технического состояния объектов машиностроения на основе фазохронометрического подхода.

3. Разработана система и методология информационно-метрологического сопровождения объектов машиностроения на основе фазохронометрического метода с возможностью передачи прецизионной информации в режиме реального времени в центры анализа данных и принятия решений.

4. Получены и определены оптимальные соотношения динамических моделей объекта при нормировании погрешностей прогнозирования измерительного процесса фазохронометрической измерительной технологии.

5. На основе фазохронометрической технологии впервые разработаны многофакторные математические модели функционирования объектов машиностроения в фазохронометрическом представлении широкого применения:

- турбоагрегатов тепловых электрических станций (ТЭЦ, ГРЭС) с учетом влияния воздействия систем возбуждения и внешней сети;

- гидроагрегата ГЭС с учетом функционирования рабочего колеса, направляющего аппарата, гидротурбины и системы возбуждения;

- металлорежущего станка токарного типа с учетом износа режущего инструмента;

- подшипника качения роликового типа;

- гармонического осциллятора на примере первичного преобразователя струнного типа (автогенератора).

6. Разработана методика измерения деградации свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации с использованием метода фазохронометрического контроля без разрушения испытываемого образца.

7. Предложена и реализована возможность демпфирования влияния воздействия внешней электрической сети в некоторых переходных режимах работы турбоагрегатов на основе измерительной фазохронометрической информации.

Апробация результатов работы:

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

- VIII, IX, X, XI, XII, XIII Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники», Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 24-26 октября 2006г, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 г.г.;
- 6-й Международной научно-технической конференции «Чкаловские чтения» г.Егорьевск (Моск. обл.) ЕАТКА и.м. В.П. Чкалова, 7-9 июля 2007г;
- X-й, XI, XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояния и проблемы измерений», Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 21-25 апреля 2008г, 2011, 2013, 2015 г.г.;
- Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», 21-25 октября 2013 г.;
- Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии», 17-19 сентября 2013. Дзержинск: 2013 г.;
- Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы обеспечения эффективности и надежности в энергетике», 16-18 мая 2013.- С.-Петербург: 2013 г.;
- I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 г.г.;
- Всероссийской научной школы «Современные технические средства диагностики металлорежущих станков», 6-7 сентября 2011, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 г.;
- IX Всероссийская научная конференция «Нелинейные колебания механических систем» 24 - 27 сентября. Нижний Новгород, 2012 г.
- Всероссийский семинар «Метрологическое обеспечение нанотехнологий: текущее состояние и перспективы развития». 20-21 ноября 2012 г. ФБУ «Нижегородский ЦСМ». Нижний Новгород. 2012 г.;
- Всероссийской научно-технической конференции «Машиностроительные технологии» (с международным участием), посвящена 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 16-17 декабря 2008г.;
- IX-ой и X-ой сессии международной научной школы Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов. Санкт-Петербург, 2009г.;
- II Всероссийский форум «Техногенные катастрофы: Технологии предупреждения и ликвидации». Москва, 17 июня 2014 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов». Воронеж, ВУНЦ ВВС «ВВА им. Проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), 4-5 марта 2014 г.
- Восьмая Всероссийская научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» (г. Санкт-Петербург), 23-25 октября 2014 г.;
- II Всероссийская научно-техническая конференция «Академические Жуковские ЧТЕНИЯ» (г. Воронеж), 25-27 ноября, 2014 г.;
- XXXIX Академические Чтения по Космонавтике посвященные памяти академика Королева С.П. (г. Москва), 27-30 января, 2015 г.
- Всероссийской научно-технической конференции «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» (г. Москва), 20-23 мая 2015;

- XL Академические Чтения по Космонавтике посвященные памяти академика Королева С.П. (г. Москва), 26-29 января. М. 2016 г.;

- Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2015». Казань. 2015. 2-4 декабря, 2015;

- IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии». Калининград, 23-28 мая 2016;

- Вторая международная научно-методическая конференция «Управление качеством инженерного образования. возможности вузов и потребности промышленности», в рамках Международного научного конгресса «Наука и инженерное образование. SEE-2016». Москва, 23-25 июня 2016 г.

- Вторая международная научно-техническая конференция «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии», 13-15 сентября 2016. Дзержинск: 2016.

Практическая значимость работы

1. Результаты работы используются на ряде предприятий страны, в том числе: ООО «Волга-СГЭМ» - «Камспецэнерго» (г. Набережные Челны), ЗАО «Уралэнерго-Союз» (г. Екатеринбург), АО «НИИП им. В.В. Тихомирова» (Моск. обл., г. Жуковский), АО «ЦКБМ» (г. Санкт-Петербург), АО «ЭЛАРА» (г. Чебоксары, Чувашская Республика).

Для реализации проекта разработана Концепция внедрения информационно технологии в гидроэнергетику (Письмо об использовании результатов работы ПАО «РусГидро», г. Москва).

Разработаны рекомендации для обеспечения надежного функционирования турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 (ТА №9 ГРЭС 1, г. Сургут) и исключения поломок валов возбуждателей и шпилек муфт.

Результаты работы нашли отражение в учебных дисциплинах, читаемых студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана: «Физические основы измерений и эталоны», «Метрологическое обеспечение жизненного цикла изделий», «Информационная поддержка жизненного цикла продукции», «Автоматизация измерений, контроля и испытаний», входящими в учебный план кафедры.

2. Применение системы измерительно-вычислительного сопровождения фазохронометрическим методом позволило регистрировать воздействия внешней электрической сети на валопровод ТА.

3. Результаты диссертации позволяют осуществлять прогнозирующий мониторинг и контроль текущего технического состояния циклических электромеханических систем на примере турбоагрегатов, гидроагрегатов, металлорежущих станков, дизель-генераторных установок в режиме реального времени.

4. Результаты диссертации могут быть использованы для контроля деградации свойств конструкционных материалов упругих элементов циклических электромеханических систем.

5. Результаты диссертации поддержаны в рамках проектов, в которых соискатель являлся научным руководителем:

- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.г. ГК №16.740.11.0710 от 08 июня 2011 г. «Разработка научных основ и технических средств прецизионного измерительного

вычислительного сопровождения жизненного цикла машин и механизмов в области станкостроения»;

- Задание № 9.1265.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности «Создание средств информационной технологии метрологического сопровождения циклических объектов машиностроения». Срок выполнения 2014-2016 г.г.

- Грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК.3625.2015.8 «Повышение точности информационного метрологического сопровождения циклических электромеханических систем с целью повышения энергоэффективности их эксплуатации». Срок выполнения 2015-2016 г.г.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 85 работах, в том числе 25 статьях в журналах, 19 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных работ соискателей ученой степени кандидата и доктора наук, 6 патентах РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов и результатов по диссертации, списка используемой литературы из 258 источников, 5 приложений. Содержит 321 страницу, в том числе 105 рисунков и 23 таблицы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Концепция метрологического обеспечения жизненного цикла циклических машин и механизмов машиностроения на основе прецизионной информации, систематически получаемой от встроенных в функционирующие контролируемые объекты фазохронометрических блоков на основе постоянно идентифицируемых математических моделей.

2. Разработана система многофакторных математических моделей функционирования объектов машиностроения с упругими характеристиками, деградирующими в фазохронометрическом представлении и учитывающая:

- для турбоагрегата - функционирование генератора и турбины, воздействие внешней сети и системы возбуждения;

- для гидроагрегата ГЭС - описывающую функционирование рабочего колеса, направляющего аппарата, вала турбины, гидрогенератора, системы возбуждения с возможностью диагностирования дефектов;

- металлорежущего станка токарного типа - привода, коробки передач, шпиндельный узел, измерение износа инструмента;

- подшипника качения роликового типа;

- линейного осциллятора – измерительный контроль переменных коэффициентов внутреннего вязкого трения и процесс деградации свойств конструкционного материала упругого элемента.

3. Методика измерения деградации свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации с использованием метода фазохронометрического контроля без разрушения испытываемого образца.

4. Возможность демпфирования влияния воздействия внешней электрической сети в некоторых переходных режимах работы турбоагрегатов на основе измерительной фазохронометрической информации.

5. Измерительно - вычислительная система фазохронометрического контроля, обеспечивающая измерительно-вычислительный мониторинг и диагностику технического состояния объектов машиностроения на примере для турбоагрегатов,

гидроагрегатов ГЭС, металлорежущих станков токарного типа, редукторов, подшипников качения, насосных агрегатов.

6. Возможность математического определения основных характеристик, выражающих внутреннее трение и упругие свойства конструкционных материалов с применение методов математической редукции измерений и формализма Гамильтона для определения изменения во времени коэффициента затухания и собственной циклической частоты.

7. Методика определения оптимального соотношения сложности модели прогнозирования и горизонта прогнозирования измерительного процесса фазохронометрической измерительной технологии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

ГЛАВА 1. Анализ существующих подходов применения измерительно-вычислительных систем поддержки жизненного цикла и диагностики объектов машиностроения.

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

Анализ измерительно - вычислительных средств сопровождения и оценки технического состояния по отраслям машиностроения, включая энергетическое турбо- машиностроение, гидро- машиностроение, металлообрабатывающего станкостроения, подшипников качения, редукторов, исследования свойств конструкционных материалов изделий машиностроения определяет следующие факторы, предъявляемые качеству новые требования.

Информационное метрологическое обеспечение надежного функционирования циклических машин и механизмов во многом решает задачи импортозамещения отечественной машиностроительной продукции. Сложившаяся обстановка приводит к смещению акцентов и приоритетов:

- необходимость не только оценки технического состояния, но и осуществление его прогнозирования в реальном времени;
- недостатки традиционных методов и отсутствие комплексного подхода к измерительно-вычислительному сопровождению эксплуатации объектов машиностроения циклического действия;
- низкая информативная эффективность существующих подходов, как следствие недостаточная прослеживаемость влияния факторов, сопровождающих начальную стадию рабочего цикла на последующие этапы жизненного цикла.

Вместе с тем, очевидна невозможность построения на традиционных организационных подходах и метрологическом уровне Единой системы информационно-метрологического сопровождения полного жизненного цикла объектов машиностроения циклического действия. Невозможно обеспечить должную степень технологической надежности вследствие нечувствительности применяемых методов подобным факторам.

Недостаточность морально устаревающих результатов в части отображения рассматриваемых процессов при производстве и эксплуатации.

Все это требует качественно новых научных подходов, базирующихся на новом уровне описания техносферы.

Предпосылки для резкого перехода на качественно новый уровень информационно-метрологического сопровождения: измерения физико-технических свойств материалов (теория наследственности, эволюция свойств), физико-математических моделей (использование теории твердого тела, прецизионное материаловедение).

В метрологии техническое освоение достижений квантовой физики привело к тому, что существовавшие ранее отдельно эталоны единиц измерения расстояния, времени и частоты образовали единый комплекс, опирающийся на фундаментальную физическую постоянную - скорость света в вакууме. Известно, что хронометрический в своей основе подход к реализации измерений больших расстояний уже давно используется в радиолокационной технике, успешно применяемой как в земных масштабах, так и в масштабах солнечной системы. Упомянутый выше эталон обязан своим появлением успехам в создании высокостабильных «атомных» часов.

Для циклических систем, в частности, механических устройств циклического действия, наиболее информативной координатой является полярный угол радиус-вектора точки, изображающий на фазовой плоскости состояние циклической системы. В отсутствии возмущений траектория этой точки образует за время полного цикла замкнутый контур.

Площадь участка фазовой плоскости, заключенного внутри этого контура и полярный угол радиус-вектора (фаза) лежащей на контуре изображающей точки могут быть использованы в качестве независимых переменных, однозначно определяющих состояние циклической системы.

Так, применение формализма Гамильтона позволяет исследовать процессы взаимодействия внутри циклической машины или механизма, деградацию во времени свойств и их приращение через исследование геометрических характеристик. В этом случае может быть использовано основное свойство гамильтоновых систем – сохранение объема произвольной области фазового пространства.

$$I = \int_{t_1}^{t_2} L_0 dt = \int_{t_i}^{t_n} L dt \quad (1)$$

Хорошо известно, что поток в фазовом пространстве остается величиной постоянной, т.е. дивергенция равна нулю. Вместе с тем, и объем фазового пространства сохраняется во времени. При этом начальное «нулевое» состояние работы циклического объекта машиностроения (турбоагрегат, гидроагрегат, станок, подшипник качения и т.п.) будет отличаться от его состояния в процессе эксплуатации, вызванное происходящими деградиционными процессами внутри него. Вместе с тем форма кривой в координатах [t,Q] – время – фаза, будет меняться от цикла к циклу, при этом площадь сохранится неизменной.

Уравнение Луивилля, выраженное через гамильтониан, представленное для циклической машины или механизма, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial Q}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial Q}{\partial p_i} \right] = [H, p] \quad (2)$$

где скобки обозначают скобки Пуассона гамильтониана H с плотностью Q.

Таким образом, сочетание высокой податливости фазы рабочего цикла объекта машиностроения, отображаемого на фазовую плоскость в виде замкнутого контура

обладает высокой жесткостью общей площади. Площадь участка фазовой плоскости, заключенного внутри этого контура и полярный угол радиус-вектора (фаза) лежащей на контуре изображающей точки могут быть использованы в качестве независимых переменных, однозначно определяющих состояние циклической системы.

ГЛАВА 2. Информационная поддержка измерительного контроля свойств конструкционных материалов объектов машиностроения в процессе функционирования.

Одним из ключевых вопросов является метрологическое обеспечение измерения свойств материалов объектов машиностроения. Как при исследовании явлений, связанных с внутренним трением в металлах, так и при оценивании параметров материалов с памятью необходимо применение прецизионных методов измерений. В обоих случаях имеет место измерение интервалов времени: либо это время релаксации или период колебаний испытываемого образца, либо время деформации среды и параметры, зависящие от него. Применение методов, основанных на прецизионных интервалах времени, позволяет сделать существенный рывок в решении поставленных задач.

В качестве примера реализации измерительного мониторинга деградации свойств конструкционного материала рассмотрим поведение механического осциллятора, материал упругого элемента которого претерпевает деградацию или известные случаи, когда упругие свойства материала в процессе длительных циклических нагрузок изменяются гораздо меньше, чем реологические.

Исследование основано на изучении эволюции физико-механических параметров, характеризующих упругость и внутреннее трение конструкционного материала «стареющей» колебательной системы. В качестве источника экспериментальной информации выступают результаты регистрации в дискретные моменты времени координаты инертной массы «стареющего» линейного осциллятора, совершающего свободные затухающие колебания.

Если поведение деградирующей системы описывается уравнением:

$$\ddot{X} + 2 \cdot \beta(\tau) \cdot \dot{X} + \omega_0^2(\tau) \cdot X = 0, \quad (3)$$

где $\beta(\tau)$ - коэффициент затухания, $\omega_0(\tau)$ - собственная циклическая частота, зависящие от времени, то, как известно, получить компактные решения в аналитическом виде не удается.

Результат решения прямой задачи приведен на Рис. 1.

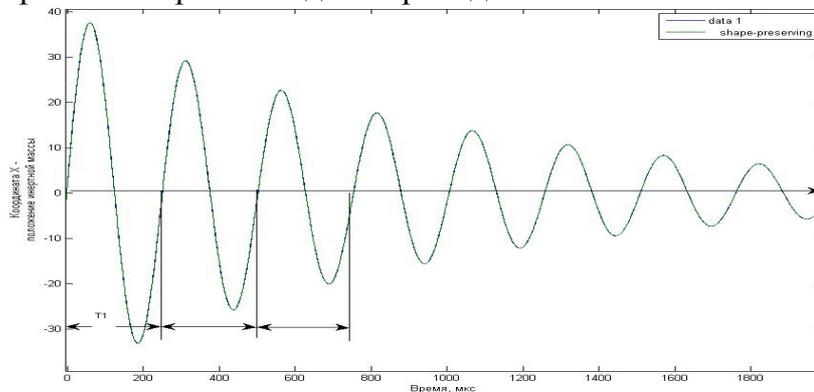


Рис. 1.

Регистрация результатов измерений положений инертной массы «стареющего» линейного осциллятора в дискретные моменты времени τ_i

Положение осциллятора в моменты времени τ_1, \dots, τ_n регистрируется по схеме $\xi_i = X_i + \nu_i$, где X_i - координаты осциллятора в определенный момент времени τ_i , ν_i - погрешность, по результатам измерений требуется оценить параметры $\beta(\tau_i)$ и $\omega_0(\tau_i)$ в каждый момент времени τ_i , $i = 1, \dots, n$. Предполагается, что в интервале времени от τ_k до τ_{k+m} эти параметры можно считать постоянными и равными β_k и $\omega_{0,k}^2$, то есть их изменение не заметно на фоне погрешности наблюдений. Фиксировав число k , задающее начало анализируемого участка данных, на котором оцениваются значения параметров β_k и $\omega_{0,k}^2$, можно представить их значения в виде вектора $f_k = \begin{pmatrix} \beta_k \\ \omega_{0,k}^2 \end{pmatrix}$. На Рис. 2 представлена схема измерений параметров «стареющего» линейного осциллятора в виде струны в дискретные моменты времени τ_i .

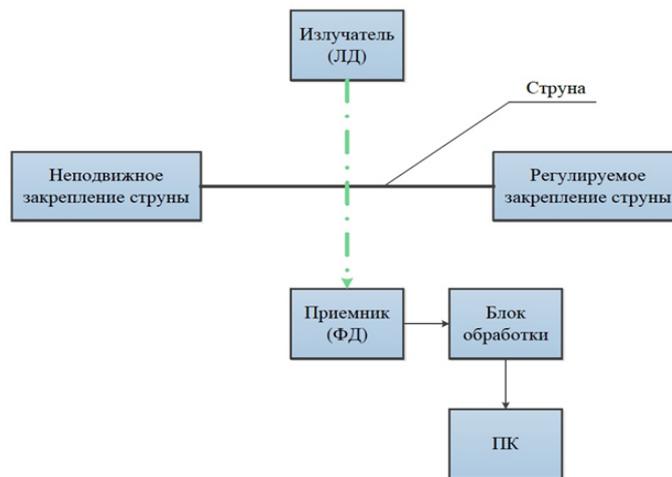


Рис. 2.

Схема измерения параметров «стареющего» линейного осциллятора в виде струны в дискретные моменты времени τ_i

Поведение деградирующей системы описывается уравнением:

$$\ddot{X} + 2 \cdot \beta(\tau) \cdot \dot{X} + \omega_0^2(\tau) \cdot X = 0, \quad (4)$$

Решается обратная задача определения $\beta(\tau_i)$ и $\omega_0(\tau_i)$ по известным значениям наблюдаемых X .

Положение осциллятора в моменты времени τ_1, \dots, τ_n регистрируется по схеме $\xi_i = X_i + \nu_i$, где X_i - координаты осциллятора в определенный момент времени τ_i , ν_i - погрешность, и по результатам измерений требуется оценить параметры $\beta(\tau_i)$ и $\omega_0(\tau_i)$ в каждый момент времени τ_i , $i = 1, \dots, n$.

Полагается, что при $\tau_k \leq \tau \leq \tau_{k+m}$ справедливо $\beta_k = const$ и $\omega_{0,k}^2 = const$. Фиксировав число k , задающее начало анализируемого участка данных, на котором оцениваются параметры β_k и $\omega_{0,k}^2$, их значения представляются в виде вектора

$$f_k = \begin{pmatrix} \beta_k \\ \omega_{0,k}^2 \end{pmatrix}.$$

Наибольший интерес представляет решение задачи для случая, когда законы изменения $\beta(\tau_i)$ и $\omega_0^2(\tau_i)$ не линейны. В частности выполнено имитационное математическое моделирование для случаев $\beta(\tau_i) = 1 \cdot (1 + \tau^2)$, $\omega_0(\tau_i) = 50(1 - \tau^2)$, в результате которого восстановлены значения исходных функций коэффициента затухания $\beta(\tau_i)$ и собственной циклической частоты $\omega_0(\tau_i)$ с относительной погрешностью не превышающей 10^{-3} %.

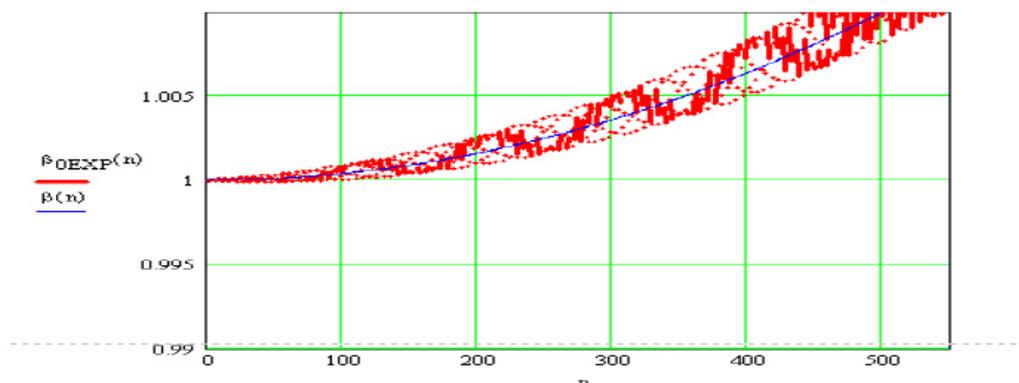


Рис. 3.

Результаты наблюдений при восстановлении коэффициента затухания $\beta(\tau_i)$, для $m = 5$, $E\beta_k^2 = 1$.

Полученные результаты (рис. 1) сосредоточены относительно исходного значения $\beta(\tau_i)$, а отклонения от заданного значения, как для $\beta(\tau_i)$, так и для $\omega_0(\tau_i)$, не превышают заданной величины дисперсии.

Известны случаи, когда упругие свойства материала в процессе длительных циклических нагрузок изменяются гораздо меньше, чем реологические. Тогда уравнение движения осциллятора может быть представлено в виде:

$$\ddot{x} + 2\beta(t)\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (5)$$

здесь x - отклонение от положения равновесия, $\beta(t)$ - коэффициент затухания, медленно изменяющийся во времени, ω_0 - собственная циклическая частота.

Выражение для приращения фазы Q в представлении формализма Гамильтона на интервалах t_{n-1}, t_n дается в виде:

$$Q_{n-1,n} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \Omega(t) dt + \frac{1}{2} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{\dot{\Omega}(t)}{\Omega(t)} \sin 2Q dt \quad (6)$$

При условиях $\frac{\dot{\beta}(t)}{\beta^2(t)} < \delta^2 \ll 1$ и, что в пределах одного периода $T_n = t_n - t_{n-1}$,

$\beta = const$, $Q_{n-1,n} = 2\pi$, оценка для β имеет вид:

$$\beta_n = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2} \quad (7)$$

Оценка величины $\dot{\beta}$ получается только из измеряемых интервалов времени:

$$\dot{\beta}_n \approx \frac{\beta_n - \beta_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} = \frac{\beta_n - \beta_{n-1}}{T_n} \quad (8)$$

Второе слагаемое уравнения (7) $\Delta Q_{n-1,n} = \frac{1}{2} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{\dot{\Omega}(t)}{\Omega(t)} \sin 2Qdt$ служит поправкой для изменения фазы колебаний линейного осциллятора.

Относительно уточненной зависимости закона изменения фазы от времени внутри периода колебаний $Q_{n-1,n}(t)$, предполагается, что в пределах одного наблюдаемого периода закон изменения коэффициента затухания носит линейный характер $\beta_n = \beta_{n-1} + \dot{\beta}_{n-1}(t - t_{n-1})$, где $\dot{\beta}_{n-1}$ - производная по времени коэффициента затухания на $(n-1)$ -ом периоде, t - текущее время, с.

Тогда погрешность фазы оценивается выражением:

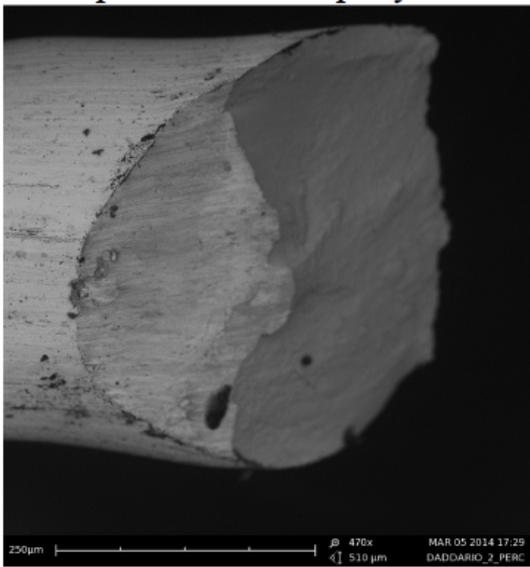
$$\Delta Q_{n-1,n} \cong 2 \left(\frac{\beta}{\omega_0} \right)^7 \beta^2 T_n t_m \delta^6 \quad (9)$$

Как показали результаты математического моделирования, погрешность определения Q зависит от β : чем больше значение β , тем большая погрешность при определении фазы колебаний линейного осциллятора.

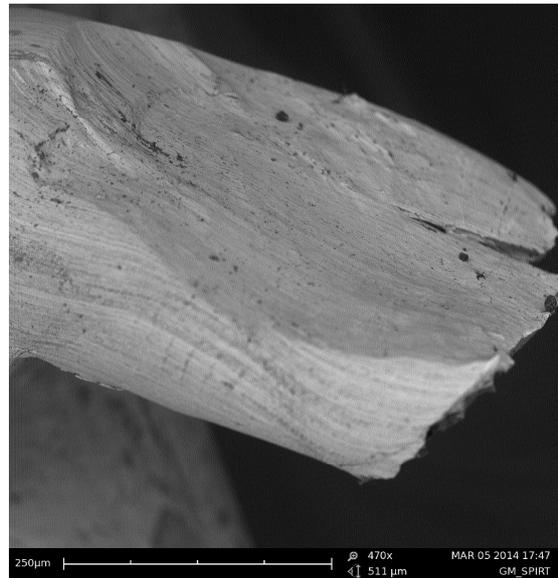
Принцип работы стенда: струна закрепляется с одной стороны неподвижно, а с другой стороны необходимо обеспечить регулируемое натяжение через систему обратной связи. Для регистрации периода колебаний применяется измерительная система излучатель - приемник. Свободные затухающие колебания возбуждаются автоматически. Период колебаний измеряется с помощью фотоэлектрического метода. Лазерный диод и приемный фотодиод согласованы по длине волны. Световой поток модулируется прохождением нулевого положения струны. Погрешность измерения интервалов времени составляет не более $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ сек.

Предлагаемая конструкция обеспечивает чувствительность фазовых соотношений, благодаря измерению которых и можно контролировать во времени деградацию медленноменяющихся свойств конструкционных материалов. Подобная инженерная реализация измерительной установки обеспечивает возможность измерения некоторых особенностей колебаний струны, например зависимости спектрального состава колебаний от натяжения и условий возбуждения струны.

На Рис. 4 представлены результаты исследования поверхности струн. Изменение диаметра на 5 мкм приводит к изменению периода на величину от 0,2 до нескольких микросекунд. Влияние шероховатости поверхности струны на периоды колебаний связано с изменением наружного диаметра. Показано, что если период свободных затухающих колебаний равен $T_1 = 0,006648184$ с, то уменьшение шероховатости поверхности струны в два раза до величины $Ra = 1,3$ мкм, приведет к изменению периода свободных затухающих колебаний в пределах ± 2 мкс.



а) Изображение поверхности среза струны D'addario EXP26, РЭМ



б) Изображение поверхности среза струны ГМ «Бронзовый век», РЭМ

Рис. 4.

В Таблице 1 приведен результат расчета влияния силы натяжения на изменение периода колебаний с учетом шероховатости поверхности образцов.

Таблица 1.

Влияние силы натяжения на изменение периода колебаний с учетом шероховатости поверхности образцов

Сила натяжения F , Н	Начальный период T , с	Приращение периода ΔT , мкс
10	0,018810738	2,066
20	0,01330120	1,461
30	0,010860385	1,193
40	0,009405369	1,033
50	0,008412418	0,924
60	0,007679452	0,844
70	0,007109791	0,781
80	0,00665060	0,730
90	0,006270246	0,689
100	0,005948478	0,654
110	0,005671651	0,623
120	0,005430192	0,596
130	0,00521716	0,573
140	0,005027381	0,552
150	0,004856912	0,534
160	0,004702684	0,516
170	0,004562274	0,501
180	0,004433733	0,487
190	0,004315479	0,474
200	0,004206209	0,462

Для реализации измерения девиации свойств конструкционных материалов погрешность системы не должна превышать $\Delta_{\Sigma}t = \pm 1,0 \cdot 10^{-7}$ сек.

Измерительный контроль девиации собственных частот крутильных колебаний валопроводов ТА при изменении жесткости одной из ступеней. Пусть в результате появления трещины в РНД жесткость участка валопровода изменяется на Δq_1 , тогда соответственно изменятся коэффициенты:

$$\Delta\delta_{11} = \Delta q_1 / J_1; \Delta\delta_{12} = \Delta q_1 / J_2. \quad (10)$$

Представив собственную крутильную частоту валопровода ТА в виде

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (11)$$

при условии $\Delta\omega \ll \omega_0$, с достаточной степенью точности можно записать

$$\omega^n = (\omega_0 + \Delta\omega)^n \approx \omega_0^n + n\omega_0^{n-1}\Delta\omega. \quad (12)$$

С учетом (11), (12), (13) получим зависимость изменения собственной частоты крутильных колебаний от жесткости:

$$\Delta\omega = F[\omega_0, \Delta\delta_{11}(t), \Delta\delta_{12}(t), \delta_{22}, \delta_{23}, \delta_{33}, \delta_{34}, \delta_{44}, \delta_{45}]. \quad (13)$$

В результате имитационного математического моделирования крутильных колебаний валопровода ТА получены расчетные частоты, близкие к экспериментальным. Применение математической модели позволяет определить девиацию свойств конструкционных материалов валопровода во времени. Для контроля девиации собственной частоты колебаний во времени в (7) вместо ω_0 подставляют собственную частоту крутильных колебаний.

В качестве начальных значений приняты данные экспериментального спектра $\omega_0 = 18,64$ Гц и $23,2$ Гц. В процессе моделирования задавали крутильную жесткость Δ (как имитация зарождения и развития кольцевых трещин валопровода) в пределах $0,0001-1,5\%$, вычисляли собственные частоты $\omega_{0м}$ с учетом трещин, оценивали относительные погрешности определения собственной частоты крутильных колебаний $\Delta\omega$. Результаты вычислительного эксперимента приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение значений собственных частот крутильных колебаний ТА ТВВ-320-2УЗ-Т-250/300-240-2, полученных в результате математического и обработки экспериментальных данных

Номер собственной частоты ТА	Значение собственной частоты крутильных колебаний, об/мин (Гц)	
	результат обработки экспериментальных данных – хронограммы	результат математического моделирования
1	1118.4 (18,64)	1116 (18,60)
2	1392 (23,20)	1432.2 (23,87)
3	-	2869.8 (47,83)

Спектральный анализ представляет широкую совокупность методов оценки характеристик процессов и материалов, поэтому для обеспечения единства измерений необходимо применять математически и метрологически обеспеченные виды

обработки.

Поскольку на практике часто приходится рассчитывать системы, состоящие из трех ступеней, например двигатель–редуктор–тормоз, то расчетное выражение для трех- секционной системы выглядит так:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\delta_{11}(\omega_0^4 - \omega_0^2(\delta_{22} + \delta_{23}) + \delta_{23}(\delta_{12} + \delta_{22})) + \Delta\delta_{12}(\omega_0^4 - \omega_0^2\delta_{23} + \delta_{11}\delta_{23})}{-6\omega_0^5 + 4\omega_0^3(\delta_{12} + \delta_{12} + \delta_{22} + \delta_{23}) - 2\omega_0(\delta_{12}\delta_{23} + \delta_{11}\delta_{23} + \delta_{11}\delta_{22} + \delta_{22}\delta_{23})} \quad (14)$$

ВЫВОДЫ: изменение жесткости одной из секций валопровода в пределах $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5} \%$ можно зарегистрировать только с применением высокоточных средств измерений и измерительных комплексов с погрешностью измерения частоты не более $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ Гц, что становится возможным при применении фазохронометрических систем, имеющих погрешности измерения периода не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с.

Представленные результаты математического моделирования измерительного контроля открывают принципиально новые возможности измерения и оценки деградации свойств конструкционных материалов валопроводов ТА в процессе функционирования, в том числе:

- решение проблемы обнаружения трещин на раннем этапе их развития путем измерения девиации собственной частоты крутильных колебаний валопровода;
- определение в процессе эксплуатации внешних циклических нагрузок на валопровод и движущиеся части механизмов;
- повышение точности определения физических параметров свойств конструкционных материалов на несколько порядков, и, как следствие, сокращение времени и повышение достоверности конструкторско-технологической отработки.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении фундаментальных исследований эволюции и деградации физико-механических свойств конструкционных материалов.

ГЛАВА 3. Математическое моделирование тематическое моделирование измерительно-вычислительных фазохронометрических технологий поддержки жизненного цикла объектов машиностроения.

В главе приведены результаты построения многофакторных математических моделей объектов машиностроения фазохронометрического типа на примере турбоагрегатов тепловых электрических станций с учетом влияния воздействия систем возбуждения и внешней сети; гидроагрегата ГЭС с учетом функционирования рабочего колеса, направляющего аппарата, гидрогенератора и системы возбуждения, металлорежущего станка токарного типа, дизель-генераторной установки тепловоза, подшипника качения роликового типа.

Результаты измерений и математического моделирования интервалов времени, выраженные в единых узаконенных физических величинах, позволяют обеспечивать непрерывный обмен данными. Таким образом, математические модели становятся обучаемыми и адаптируемыми к текущему техническому состоянию исследуемого объекта. Применение многофакторных математических моделей объектов машиностроения наряду с получаемой фазохронометрической информацией, содержащейся в вариациях регистрируемых моментов времени и продолжительности интервалов между ними, открывает возможность изучения, оценки и прогноза технического состояния.

Математическое моделирование в фазохронометрическом представлении реализует получение многофакторных адаптируемых моделей исследуемых объектов машиностроения. При этом считается, что достижению равномерно распределенных границ интервалов «квантов фазы» $\Delta\theta_n \left(\Delta\theta_n = \frac{2\pi}{N} \right)$ соответствуют прецизионно регистрируемые моменты времени t_i . При равномерном вращении циклических электромеханических систем (валопровод турбоагрегата, гидроагрегата, шпиндель станка и т.п.) повороту на угол $\Delta\theta$ соответствует интервал времени Δt_n . В вариациях интервалов $\delta\Delta t_i (\delta\Delta t_i = \Delta t_i - \Delta t_n)$ содержится информация о функционировании исследуемого объекта.

На примере построения обобщённой математической модели гидроагрегата показано, что математическая модель строится с учетом описанных физической электродинамики моделей ротора, статора, системы возбуждения, гидротурбины и протекающих нестационарных гидродинамических и электромеханических процессах в гидрогенераторе и гидротурбине. При построении многофакторной математической модели гидроагрегата в фазохронометрическом представлении необходимо учитывать влияние демпферных обмоток.

$$\begin{aligned} J_p \ddot{\varphi}_p + k(\varphi_p - \varphi_m) &= M_{эд} - M_{тр\text{ шт}} - M_{тр\text{ ши}} \\ J_m \ddot{\varphi}_m + k(\varphi_m - \varphi_p) &= M_m \\ F(Q, \dot{Q}, H, N_m, \{a_i\}) &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где J_p, J_m - моменты инерции ротора и турбины соответственно,

φ_p, φ_m - углы поворота ротора и турбины соответственно,

$M_{эд}$ - момент электродвижущий,

M_m - момент турбины,

$M_{тр\text{ шт}}$ - момент трения подшипника,

$M_{тр\text{ ши}}$ - момент трения подшипника,

Q - расход воды,

H - напор,

N_m - мощность турбины.

$\{a_i\}$ - набор геометрических характеристик.

Представим математическую модель гидроагрегата в следующем виде:

$$\begin{cases} J_m \cdot \ddot{\theta}_1 = M_m - k_{12} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ J_{ен} \cdot \ddot{\theta}_2 = k_{12} \cdot (\theta_1 - \theta_2) - k_{23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) - M_{мпши1} \\ J_p \cdot \ddot{\theta}_3 = k_{23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) - k_{34} \cdot (\theta_3 - \theta_4) - M_{мпш} - M_э \\ J_{ен} \cdot \ddot{\theta}_4 = k_{34} \cdot (\theta_3 - \theta_4) - M_{мпши2}, \end{cases} \quad (16)$$

где $J_m, J_{ен}, J_p, J_{ен}$ - моменты инерции турбины, валопровода, ротора, вала – надставки соответственно;

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ – углы поворота турбины, валопровода, ротора, вала – надставки соответственно относительно неподвижной системы координат;

k_{12}, k_{23}, k_{34} – крутильные жесткости между соответствующими индексам частям гидроагрегата;

$M_m, M_{тршп1}, M_{тршп2}, M_{э}, M_{тршп3}$ – моменты турбины, сил трения турбинного подшипника, сил трения подпятника, электромагнитный момент, момент сил трения генераторного подшипника соответственно.

Реализуется Единый подход к построению многофакторных математических моделей объектов машиностроения фазохронометрического вида для измерительных технологий поддержки жизненного цикла.

При реализации многофакторного математического моделирования объектов машиностроения в целях создания измерительно-вычислительных фазохронометрических технологий поддержки жизненного цикла объектов машиностроения производится:

- создание математических моделей со степенью подробности, необходимой для прецизионного определения величин диагностируемых параметров и возможных дефектов, рабочего цикла частей машины;

- анализируется и описывается взаимодействие для взаимосвязи результатов измерений с соответствующими процессами в работающих частях механизмов и машин в фазохронометрическом информационном представлении.

В процессе обработки результатов измерений выполняют уточнение величин параметров, входящих в математические модели, на соответствие текущему техническому состоянию объекта, затем по результатам имитационного математического моделирования определяют величины диагностируемых параметров и возможных дефектов машины, по которым оценивают текущее техническое состояние машины, применяя уточненные модели.

ГЛАВА 4. Опытно-промышленная реализация и конструктивные особенности измерительно-вычислительных фазохронометрических систем поддержки жизненного цикла объектов машиностроения.

В основе построения экспериментальных измерительных информационных фазохронометрических систем лежит общая единая концепция их построения. В общем случае измерительные блоки и системы предназначены для измерения интервалов времени, соответствующих повторяющемуся заданному перемещению элемента или элементов механизма. Основными конструктивными элементами являются:

- датчик перемещения элемента или элементов механизма;
- оптико-электронная система съема измерительной информации;
- средство измерения интервалов времени между импульсами, поступающими от датчиков при прохождении элементов циклической системы.

Системы измерений дополнительно могут включать опорный канал измерений, датчик опорного канала, таймер общего счета, запускающий последовательность счетных импульсов, генератор счетных импульсов, память, средство формирования записи измеренных интервалов времени в память, систему передачи измерительной информации в устройство математической обработки.

Построенные по единому принципу блоки и системы являются первичными для обработки фазохронометрической измерительной информации. Возможны

различные варианты конструктивного и схемного исполнения в зависимости от функционального назначения.

Конструкция измерительной системы, установленная непосредственно на функционирующем объекте – турбоагрегате ГРЭС представляет собой диски с пазами, прикрепленными на валу возбудителя и муфте РВ-РГ. К дискам конструктивно прикреплены информационно-измерительные системы.

Период колебаний измеряется с помощью фотоэлектрического метода. Лазерный диод и приемный фотодиод согласованы по длине волны. Световой поток модулируется через отверстие в диске и падает на фотоприемник. От фотодиода первичный сигнал передается в блок формирования измерительного импульса, далее измерительный импульс сигнал поступает в блок измерений интервалов времени.

Измерительный комплекс включает основную фазохронометрическую измерительную систему, дополненную другими важными для обеспечения функционирования и поддержки жизненного цикла объектов машиностроения системами (измерение электрических величин, виброизмерительный комплекс, измерения температуры, измерения электродинамических величины, пространственно-временных измерений и т.п.). На Рис. 5 приведена структурная схема измерительного вычислительного комплекса обеспечения функционирования гидроагрегата ГЭС в интересах ПАО «РусГидро». Данный комплекс содержит фазохронометрическую систему измерений, систему пространственно-временных измерений, систему контроля электродинамических процессов в генераторе, систему измерений вертикальных перемещений.

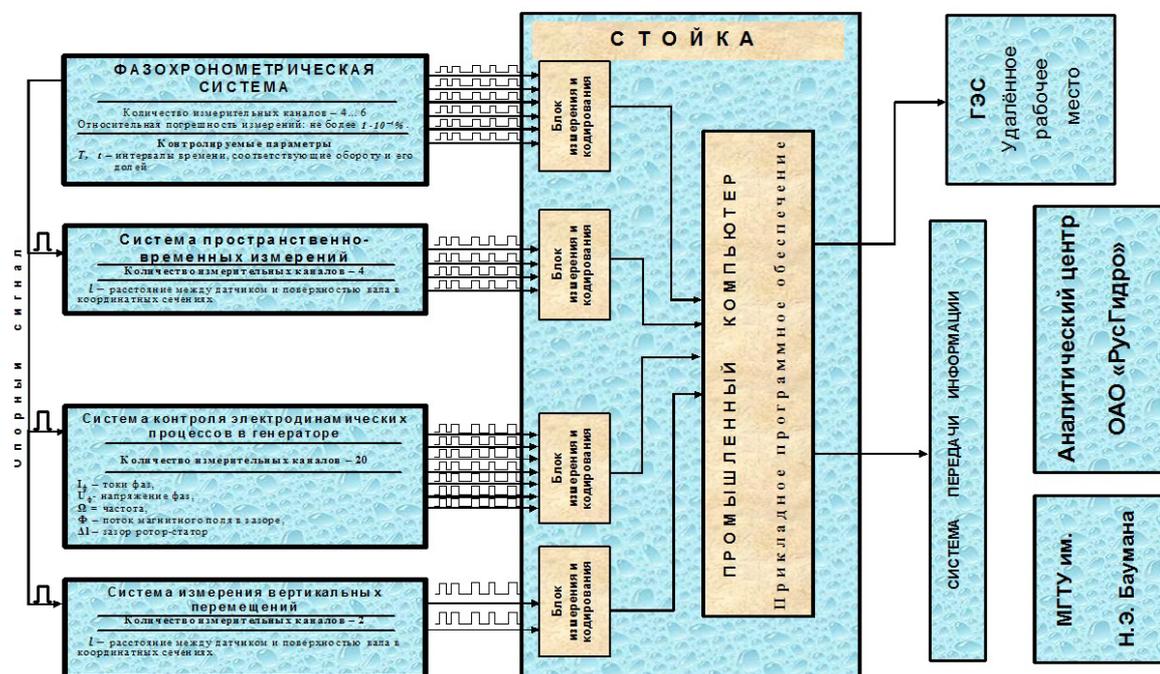


Рис. 5.

Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса гидроагрегата ГЭС с возможностью передачи измерительной информации в «Аналитический Центр» принятия решения

В целях реализации обработки результатов измерений, уточнения параметров, входящих в математические модели, на соответствие текущему техническому состоянию машины, математической обработки и определения возможных дефектов

машины измерительно-вычислительные комплексы содержат промышленный компьютер с прикладным и специальным программным обеспечением.

Другим примером является информационная фазохронометрическая система измерений параметров турбоагрегата. Особенностью измерительной системы турбоагрегата №9 ГРЭС-1 (г. Сургут) является возможность передачи защищенной измерительной информации на серверы ЗАО «Уралэнерго-Союз» и кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

По результатам обработки измерительной информации, поступающей от измерительно-вычислительного комплекса, оценивается текущее техническое состояние объекта машиностроения.

Обязательным элементом измерительно-вычислительных комплексов поддержки жизненного цикла объектов машиностроения является применение специализированного программного обеспечения анализа и обработки данных и имитационное многофакторное математическое моделирование параметров функционирования.

Первичный анализ рядов сигналов датчиков заключается в построении и сопоставлении массивов рядов прецизионных интервалов времени на разных временных промежутках. Вторичный анализ - статистическая математическая обработка методами, признанными оптимальными для обработки сигналов прецизионных интервалов времени с учетом нюансов соответствующего класса обеспечиваемых объектов циклических машин: корреляционный анализ хронограмм вращения; спектральный анализ хронограмм вращения; кросс - спектральный анализ; преобразование Фурье; анализ трендов; режимный и «сезонный» анализ (в зависимости от загрузки оборудования, сложности обработки материалов, времени работы и т.п.). Результатом имитационного математического моделирования является получение имитационных хронограмм, производных частотных спектров. Полученные в результате вычислительного эксперимента результаты сравнивают с экспериментальными данными, критериями для сравнения экспериментальных и имитационных данных измерительной информации в первую очередь математические (разброс диапазона значение, тренд замедления или ускорения, выход на установившемся режиме за пределы поровых значений).

Данные экспериментальных хронограмм в первую очередь используют для уточнения параметров используемых математических моделей диагностируемой циклической машины и дальнейшей аппроксимации имитационных результатов.

На Сургутской ГРЭС-1 проведена реконструкция системы возбуждения турбогенератора ТВВ-200 блока №9, установлена фазохронометрическая система измерений крутильных колебаний в плоскости конца возбудителя турбоагрегата, а так же в плоскости муфты генератор-возбудитель.

Фазохронометрическая система состоит из:

- информационного измерительного диска, установленного на торце РВ;
- информационного измерительного диска, установленного в районе муфты РВ-РГ;
- адаптера регистрации электрических параметров и фазохронометрических измерений в отдельном шкафу;
- оптических линии связи со встроенными объективами, соединяющих излучающий и приемный входы адаптера;
- измерительного модуля регистрации электрических параметров.

Модуль регистрации электрических параметров имеет 6 каналов измерений, он регистрирует как параметры ГГ, так и ВГ, включая:

- напряжение между фазами А и В статора главного генератора [В];
- ток фазы А статора главного генератора [А];
- активную мощность главного генератора [Вт];
- реактивную мощность главного генератора [Вар];
- напряжение между фазами А и В статора вспомогательного генератора [В];
- ток фазы А статора вспомогательного генератора [А];

ФХС имеет один опорный и два информационных канала. Она состоит из двух установленных на валопроводе ТА информационных дисков, шкафа измерения и шкафа сбора данных.

Результаты проведенных испытаний независимой тиристорной системы возбуждения типа СТН-1В-330-2800-2 УХЛ4 с применением фазохронометрической системы измерений при работе турбогенератора ст. № 9 в сети показали:

- независимая тиристорная система возбуждения типа СТН-1В-330 -2800-2 УХЛ4 полностью удовлетворяет требованиям современных норм и современных возможностей микропроцессорных защит;

- настройки системы возбуждения типа СТН-1В-330-2800-2 УХЛ4 турбоагрегата ТВВ-200-2-К-200-130 (№9 ГРЭС-1, г. Сургут) соответствуют требованиям и обеспечивают функционирование турбоагрегата (поддержание стабильности выходных электрических параметров) в переходных режимах работы, что подтверждается опытами форсировок и совместными измерениями электрических характеристик функционирования и фазохронометрических;

- оценка на основе измерительной фазохронометрической информации подтвердила возможности демпфирования системой возбуждения типа СТН-1В-330-2800-2 УХЛ4 влияния воздействия внешней электрической сети в переходных режимах работы турбоагрегата ТВВ-200-2 К-200-130 (№9 ГРЭС-1, г. Сургут);

- подтверждена значительно более высокая детальность фазохронометрической информации, по сравнению с результатами измерения электрических параметров. Фазохронометрическая информация отражает воздействие внешней сети, системы управления и особенности функционирования непосредственно ТА.

Результаты испытаний показали, что реконструированная система возбуждения СТН-1В-330-2800-2-УХЛ4 обеспечивает режимы работы регулятора системы возбуждения, *исключающие* аномальные нагрузки на механические узлы сочленения РВ-РГ. Установленная система возбуждения полностью выполняет свое основное назначение с учетом современных норм и новых возможностей микропроцессорных защит.

Построены и испытаны системы металлорежущих станков токарного типа моделей Hwacheon Cutex-240 В SMC (пр-во Южная Корея, ЧПУ SiemensSinumerik 808D), УТ16П (пр-во Россия), 16K20Ф (модернизированный станок с ЧПУ FlexNC, пр-во Россия), G.D.W. 240 CNC (пр-во Германия, ЧПУ Heidenhain).

Измерительно-вычислительные фазохронометрические технологии поддержки жизненного цикла металлорежущего оборудования обеспечивают комплексное решение следующих задач:

- измерение параметров вращения асинхронного привода или мотор-редуктора;
- измерение износа зубчатых колес коробки скоростей;
- измерение параметров и исследование процесса резания (датчики со стороны задней бабки);

- измерение параметров обработки заготовки и износа режущего инструмента (датчики в соответствующих сечениях заготовки);
- измерение износа режущего инструмента в процессе обработки и прогнозирование остаточной стойкости режущего инструмента.

ГЛАВА 5. Вычислительный эксперимент и отработка многофакторных математических моделей для использования в системах информационного метрологического обеспечения.

Проведено имитационное математическое моделирование и реализация вычислительного эксперимента в целях исследования на примере работы гидроагрегата, моделирования дефектов. В Таблице 3 приведены оценочные расчеты влияния чувствительности измерительного фазохронометрического комплекса, вызванных внешними или внутренними факторами.

Таблица 3.

Расчет влияния чувствительности измерительного фазохронометрического комплекса на внешние или внутренние влияющие факторы

Влияющий параметр	Величина отклонения	Изменение угла качания, угл. мин.	Изменение интервалов времени, мкс
Изменение гидродинамического момента турбины	±5%	0,063 - 0,343	3,03 – 16,50
Изменение электромагнитного момента	±5% ±25%	0,011 0,850	0,5 40,2
Потери на трение в подпятнике (трение в подпятнике)	±0,2%	0,0045	0,2
Влияние сейсмического импульса	±100%	0,540	24

Габаритно-массовые характеристики гидроагрегатов, физико-технические характеристики свойств конструкционных материалов могут определить невысокую чувствительность измерительных средств к деградациям в процессе эксплуатации. Предварительно следует оценить чувствительность измерительно-вычислительной системы в целях возможности определения отклонения величины в результате влияния того или иного воздействующего фактора.

Для обоснования применения фазохронометрического метода для диагностики ГА разработана математическая модель и выполнены следующие оценки функционирования ГА при измерении интервалов времени, соответствующих обороту и его долям:

- износ кинематики лопатки поворотно-лопастной турбины;
- определение размерного состояния масляного клина в подпятнике;
- определение изменений в работе системы ротор-статор (для определения дефектов необходимо также измерение электрических параметров).

В исходных данных был задан износ трущихся поверхностей в кинематике лопатки и определено изменение параметров вращения турбины, выделенное на

круговой диаграмме. Исходные данные взяты для гидроагрегатов Нижнекамской ГЭС. По круговой шкале указана дискретность съема информации, а по радиальной – интервалы времени. Дискретность съема 96 интервалов времени за оборот турбины, а по радиусу длительность интервалов времени. Так как как измеряемой физической величиной также являются интервалы времени, то обработка их рядов позволяет выявлять дефект в автоматическом режиме. На Рис. 6. Приведена круговая диаграмма контроля зазора подпятника.

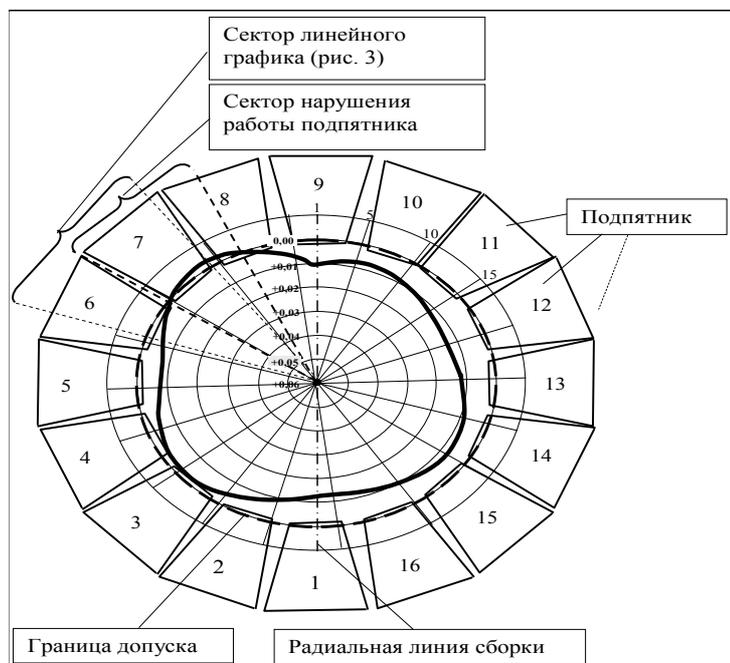


Рис. 6.
Круговая диаграмма контроля зазора подпятника

В процессе реализации вычислительных экспериментов и отработки многофакторных математических моделей для использования в системах информационного метрологического обеспечения получены следующие практические результаты:

- приведен пример оценки функционирования гидроагрегатов ГЭС при измерении интервалов времени, соответствующих обороту и его долям на примере износа кинематики лопатки поворотно-лопастной турбины, определение размерного состояния масляного клина в подпятнике, определение изменений в работе системы ротор-статор (для определения дефектов необходимо также измерение электрических параметров);

- возбуждение генератора, вызванное изменением амплитуды угла качания, превышающее изменение амплитуды качания валопровода турбины, происходит при воздействии на статор серии импульсов, а не одиночного импульса с периодом колебаний, меньшим периода вращения турбоагрегата в 3 и более раза;

- показано на примере математического моделирования фазохронометрического вида, что исследование циклических электромеханических систем роторного типа на примере турбоагрегатов тепловых электрических станций невозможно без контроля крутильных колебаний;

Математическое многофакторное моделирование обеспечивает взаимосвязь результатов измерений и обработки измерительной информации (например, спектр крутильных колебаний, собственные частоты, хронограмма вращения турбоагрегата и др.) с конструкцией ТА. Позволяет осуществить переход от экспериментальных данных к индивидуальным характеристикам системы (моменты инерции, жесткости, габаритно-массовые, электрические параметры и др.);

- при выполнении вычислительных экспериментов в качестве исходных параметров для анализа функционирования турбоагрегата могут задаваться экспериментальные результаты измерений, в том числе:

- изменение токов главного и вспомогательного генератора;
- изменение напряжения главного и вспомогательного генератора;
- изменение времени полного и долей оборота (изменение угловой частоты, полученное с высокой точностью) и др.

Активное использование результатов измерений фазохронометрической информации в составе системы управления (СУ) обеспечит:

- сокращение амплитуды скручивающего момента на муфте РВ-РГ до 10 раз;
- уменьшение амплитуды углов качания до 4 раз;
- уменьшение приращения токов по осям d и q , что приведет к снижению механических нагрузок на ходовые части валопровода турбоагрегата и электрических на токонесущие тракты системы.

Измерительно-вычислительная технология на базе фазохронометрического метода открывает новые возможности мониторинга процессов амортизации и оценки технического состояния оборудования и инструмента, деградиационных процессов в конструкционных материалах, определения раннего зарождения дефектов, в перспективе может обеспечить решение следующих задач:

- оценки текущего технического состояния металлорежущих станков;
- определения оптимальных с технологической точки зрения режимов резания;
- оценки технического состояния узлов, вспомогательного оборудования;
- оценка износа и поломок режущего инструмента в процессе работы станка;
- повышения экономичности и надежности эксплуатируемого металлорежущего оборудования.

ГЛАВА 6. Единая измерительно-вычислительная технология сопровождения эксплуатации объектов машиностроения циклического действия на базе фазохронометрического подхода.

Построенная на применении фазохронометрического подхода измерительно-вычислительная технология сопровождения эксплуатации объектов машиностроения циклического действия Единая Концепция обладает рядом преимуществ:

- универсальность построения измерительной технологии для объектов циклического действия в отраслях: энергомашиностроения, гидроэнергетики, станкостроения, редукторостроения, транспортного машиностроения, производства подшипников качения, производство и генерация элеткрической энергии, нефтедобывающая и газодобывающая отрасли и т.п.;

- реализация измерительно-вычислительного комплекса метрологического обеспечения жизненного цикла в Едином опорном времени с момента первого запуска/испытаний с привязкой результатов измерений и хронометрических методик к Государственным поверочным схемам средств измерений времени и частоты;

- применение на всех этапах имитационного математического моделирования объектов машиностроения, верификация и идентификация применяемых

математических моделей в фазохронометрическом представлении, реализация интеллектуальных измерительных комплексов, адаптируемых к условиям функционирования;

- обеспечивается комплексный Единый подход измерительно-вычислительной технологии сопровождения эксплуатации объектов машиностроения циклического действия на базе фазохронометрического метода.

Единый подход измерительно-вычислительной технологии сопровождения эксплуатации объектов машиностроения циклического действия на базе фазохронометрического метода в общем случае включает следующие составляющие:

1) предварительное определение и перечня диагностируемых параметров и возможных дефектов объекта машиностроения циклического действия и структурное разбиение машины на конструктивные части, критически важные для диагностирования параметров и возможных дефектов;

2) разбиение рабочего цикла объекта машиностроения и его элементов на отдельные фазы;

3) составление со степенью подробности, необходимой для прецизионного определения величин диагностируемых параметров и возможных дефектов, математических моделей рабочего цикла частей машины и их взаимодействия в фазохронометрическом информационном представлении для взаимосвязи результатов измерений с соответствующими процессами (фазами цикла) в работающих частях машины,

4) установку в частях машины прецизионных (с относительной погрешностью не более 10^{-4} %) хронометрических датчиков фаз рабочего цикла, выходы датчиков связаны с блоком обработки сигналов их измерений, в блоке также установлены рабочие программы математических моделей рабочего цикла частей машины и их взаимодействия для последующей обработки результатов измерений, при этом расположение датчиков в машине обусловлено конструкцией частей циклически работающей машины, а места установки датчиков определяют с точки зрения получения наиболее полной информации о работе частей машины;

5) прецизионные измерения указанными датчиками интервалов времени фаз рабочих циклов частей машины и их взаимодействия с представлением обработанной измерительной информации в едином метрологическом формате на всех этапах жизненного цикла машины и в математическом моделировании рабочих циклов частей машины и их взаимодействия, а именно: получение массивов данных, образованных сериями измеренных последовательно (без пропусков) рядов интервалов времени фаз в едином опорном времени;

6) в ходе обработки результатов измерений выполняют уточнение величин параметров, входящих в математические модели, на соответствие текущему техническому состоянию машины, а затем по результатам имитационного моделирования с использованием уточненных моделей и с последующей математической обработкой определяют величины диагностируемых параметров и возможных дефектов машины, по которым оценивают текущее техническое состояние машины.

Это последовательность общих приемов действий фазохронометрического метода, которые необходимо каждый раз творчески применять с индивидуальными нюансами реализации для диагностирования конкретных типов циклических машин.

На примере реализации измерительно-вычислительной технологии металлорежущих станков показано, что используя результаты ММК - идентификации

функции преобразования в зависимости от решаемой задачи может быть определена оптимальная функция прогнозирования и горизонт прогноза. Исходя из полученных результатов следует, что минимальному значению среднего модуля погрешности неадекватности соответствует функции прогнозирования, при этом горизонт прогноза $\approx 20\%$. средний модуль погрешности неадекватности равен $\bar{E}_{10}^{[5]} = 14,4918 \cdot 10^{-8}$ При упрощении модели прогнозирования (упрощения кода структуры) функция с физической точки зрения хуже описывает реальный процесс, однако может быть спрогнозирована на больший промежуток времени.

При упрощении функции структуры модели функция прогнозирования принимает другой вид, в этом случае средний модуль погрешности неадекватности равен $\bar{E}_{10}^{[5]} = 20,2195 \cdot 10^{-8}$. Реальный процесс прогнозируется с большей погрешностью, определенной величиной СМПН, однако сама функция может быть спрогнозирована с горизонтом $\approx 25\%$.

Оценена погрешность измерительной фазохронометрической системы. Расчет метрологических характеристик измерительного канала показал, что увеличение точности электромеханических систем нецелесообразно производить, повышая разрядность электронного блока измерения, поскольку полезная составляющая сигнала значений периода будет поглощена паразитными временными сдвигами импульсов под действием шума, при этом погрешность передачи информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи. Суммарная погрешность определения момента времени равна:

$$\Delta_{\Sigma}t = \pm 3,06 \cdot 10^{-8} \text{ сек.} \quad (17)$$

Проведена оценка эквивалентности измерений гауссовской модели. При этом показано, что результат однократного измерения является случайной величиной и имеет гауссовский закон распределения. Данный результат доказывает возможность проведения проверки метрологических характеристик измерительных каналов фазохронометрических систем без учёта изменений условий эксплуатации и аппаратной части.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана концепция измерительной фазохронометрической технологии поддержки жизненного цикла объектов машиностроения, реализующая:

- предварительное определение перечня диагностируемых параметров и возможных дефектов объекта машиностроения циклического действия и структурное разбиение машины на конструктивные части, критически важные для диагностирования параметров и возможных дефектов;

- разбиение рабочего цикла объекта машиностроения и его элементов на отдельные фазы;

- составление математических моделей рабочего цикла частей машины и их взаимодействия в фазохронометрическом информационном представлении со степенью подробности, необходимой для прецизионного определения величин диагностируемых параметров и возможных дефектов, для взаимосвязи результатов измерений с соответствующими процессами (фазами цикла) в работающих частях машины;

- установку в частях машины прецизионных (с относительной погрешностью не более $10^{-4} \%$) хронометрических датчиков фаз рабочего цикла, выходы датчиков связаны с блоком обработки сигналов их измерений;

- прецизионные измерения интервалов времени фаз рабочих циклов частей машины и их взаимодействия с представлением обработанной измерительной информации в едином метрологическом формате на всех этапах жизненного цикла машины и в математическом моделировании рабочих циклов частей машины и их взаимодействия в едином опорном времени;

- уточнение величин параметров, входящих в математические модели, на соответствие текущему техническому состоянию машины, а затем по результатам имитационного моделирования с использованием уточненных моделей и с последующей математической обработкой определяют величины диагностируемых параметров и возможных дефектов машины, по которым оценивают текущее техническое состояние машины.

2. Разработан методологический подход к идентификации оптимальной функции прогнозирования и горизонта прогноза измерительной фазохронометрической технологии. Показано, что минимальному значению среднего модуля погрешности неадекватности соответствует функции прогнозирования с горизонтом прогноза $\approx 20\%$, средний модуль погрешности неадекватности (СПМН) равен $\bar{E}_{10}^{[5]} = 14,4918 \cdot 10^{-8}$. При упрощении функции структуры модели функции прогнозирования СПМН равен $\bar{E}_{10}^{[5]} = 20,2195 \cdot 10^{-8}$, процесс прогнозируется с горизонтом $\approx 25\%$.

3. Разработана единая измерительная информационная фазохронометрическая технология поддержки жизненного цикла объектов машиностроения, обеспечивающая:

- измерение механических нагрузок на элементы валопровода;
- проведение испытаний тиристорных систем возбуждения;
- оценку влияния на работу турбоагрегата внешней электрической сети и систем управления;
- измерение параметров крутильных колебаний валопроводов в целях регистрации накопления повреждений в металле;
- внедрение стационарных и переносных систем мониторинга и контроля параметров функционирования, крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов.

4. Разработана система многофакторных математических моделей функционирования объектов машиностроения с упругими характеристиками, деградирующими в фазохронометрическом представлении и учитывающая:

- для турбоагрегата - функционирование генератора и турбины, воздействие внешней сети и системы возбуждения;
- для гидроагрегата ГЭС - описывающую функционирование рабочего колеса, направляющего аппарата, вала турбины, гидрогенератора, системы возбуждения с возможностью диагностирования дефектов;
- металлорежущего станка токарного типа - привода, коробки передач, шпиндельный узел, измерение износа инструмента;
- подшипника качения роликового типа;
- линейного осциллятора – измерительный контроль переменных коэффициентов внутреннего вязкого трения и процесс деградации свойств конструкционного материала упругого элемента.

5. Разработан метод контроля деградации свойств электромеханических систем, основанный на измерениях девиации собственных частот крутильных колебаний на примере турбоагрегатов ТВВ-320-ТГ-250 и ТВВ-200-2-К-200-130.

6. Доказана возможность математического моделирования основных характеристик, выражающих внутреннее трение и упругие свойства конструкционных материалов, с применением методов математической редукции измерений и формализма Гамильтона для определения изменения во времени коэффициента затухания и собственной циклической частоты.

7. Реализована система и методика информационно-метрологического фазохронометрического сопровождения турбоагрегатов электрических станций с возможностью передачи прецизионной информации в режиме реального времени непосредственно с объекта в центр обработки и анализа данных (ТА №9 ГРЭС-1, г. Сургут в ЗАО «Уралэнерго-Союз», МГТУ им. Н.Э. Баумана).

8. Установлено, что в случае воздействия на обмотку статора импульса с периодом колебаний, кратным собственным частотам турбоагрегата возникает электрический резонанс, который вызывает существенное увеличение амплитуды угла качания возбудителя, резкое повышение тока возбудителя и, как следствие, ударное воздействие большого крутящего момента на муфту возбудителя.

9. Показано, что увеличение точности электромеханических систем нецелесообразно производить, повышая разрядность электронного блока измерения, поскольку полезная составляющая сигнала значений периода будет поглощена паразитными временными сдвигами импульсов под действием шума, при этом погрешность передачи информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи составляет $\Delta_{\Sigma}t = \pm 3,06 \cdot 10^{-8}$ сек.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

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

1. Комшин А.С., Орлова С.Р. Контроль деградации конструкционных материалов в процессе эксплуатации на примере струнных элементов // Измерительная техника. 2016. №6. С. 26-29/ Komshin A.S., Orlova S.R. Control of Degradation of Construction Materials in the Course of Use for the Case of String Elements // Measurement Techniques. 2016. V. 59, № 6. P.589-594. (0,8 п.л./0,4 п.л.)

2. Комшин А.С. Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом // Измерительная техника. 2013. №8. С. 12-15 / Komshin A.S. Mathematical modelling of measurement-computational monitoring of the electromechanical parameters of turbine units by a phase-chronometric method // Measurement Techniques. 2013. V. 56, № 8. P. 850-855. (0,65 п.л.)

3. Комшин А.С., Медведева О.В. Измерительный контроль деградации свойств конструкционных материалов валопроводов // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 34-38 / Komshin A.S., Medvedeva O.V. Measurement Control of the Degradation of the Properties of the Structural Materials of Shaft Lines // Measurement Techniques. 2014. V. 57, №5. P. 526-532. (0,9 п.л./0,45 п.л.)

4. Комшин А.С. Математическое моделирование процесса измерительного контроля деградации конструкционных материалов // Метрология. 2010. №8. С. 17-22 / Komshin A.S. Mathematical modeling of the process of measurement control of the degradation of construction materials // Measurement Techniques. 2010. V. 53. № 9. P. 976-979. (0,8 п.л.)

5. Комшин А.С. Имитационное математическое моделирование экспериментального определения параметров деградирующей колебательной системы // Измерительная техника. 2008. №10. С. 5-8. / Komshin A.S. Simulation modeling of the experimental parameter determination for a deteriorating vibrational system // Measurement Techniques. 2008. V. 51, № 10. P. 1053-1057. (0,8 п.л.)
6. Многофакторное информационно-метрологическое сопровождение эксплуатации гидроагрегатов на базе фазохронометрического метода / А.С. Комшин [и др.]. Гидротехническое строительство. 2015. №2. С. 2-8. (1,0 п.л./0,2 п.л.)
7. Испытания системы возбуждения турбогенератора совместно с фазохронометрической системой / А.С. Комшин [и др.]. Приборы. 2016. №12. С.14 - 20. (0,9 п.л./0,225 п.л.)
8. Разработка системы измерительного контроля адгезионных соединений в машиностроении с учетом влияния шероховатости поверхности / А.С. Комшин [и др.]. Приборы. 2016. №11. С.9 -13. (0,9 п.л./0,225 п.л.)
9. Фазохронометрия как основа совершенствования производственных технологий / А.С. Комшин [и др.]. Научно-технические технологии. 2016. №9. С. 10-15. (1,0 п.л./0,14 п.л.)
10. Комшин А.С. Информационно-метрологическое обеспечение эксплуатации объектов машиностроения // Стандарты и качество. 2015. № 12 (942). С. 48-52. (0,65 п.л.)
11. Комшин А.С., Обухов И.В., Сырицкий А.Б. О возможности оценки постоянной составляющей систематической погрешности средств измерений посредством обработки результатов измерений // Приборы. 2016. №2. С.24 – 30. (0,75 п.л./0,25 п.л.)
12. Многофакторные математические модели функционирования авиационных газотурбинных двигателей в фазохронометрическом представлении / А.С. Комшин [и др.]. Метрология. 2011. №9. С. 13-27. (0,9 п.л./0,18 п.л.)
13. Комшин А.С., Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Оценка технического состояния станка УТ16П фазохронометрическим методом // Наука и образование. Электронный журнал. Эл. №ФС 77-48211/500269. <http://engbul.bmstu.ru/doc/500269.html>. №02. Февраль 2013. DOI: 10.7463/0213.0532755. (1,3125 п.л./0,4375 п.л.)
14. Киселев М.И., Комшин А.С. Особенности динамики дизель-генераторных установок тепловозов // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2012. №5 (2). С. 107-112. (0,82 п.л./0,41 п.л.)
15. Бережко И.А., Гостюхин О.С., Комшин А.С. Измерительные информационные фазохронометрические системы для диагностики в области электроэнергетики // Приборы. 2014. № 5. С. 13-17. (0,9 п.л./0,3 п.л.)
16. Комшин А.С. Мониторинг оборудования в сфере энергетики - требование безопасности // Стандарты и качество. 2014. № 2 (919). С. 24-27. (0,7 п.л.)
17. Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Метрологическое обеспечение нанотехнологий в промышленных условиях // Наноинженерия. 2014. № 4 (34). С. 14-19. (0,9 п.л./0,45 п.л.)
18. Комшин А.С. Метрологическое обеспечение измерения параметров конструкционных материалов в процессе эксплуатации в машиностроении // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. № 6. С. 2-7. (0,75 п.л.)

19. Особенности измерительного контроля сборки клеевых соединений электрорезистивными и электроемкостными методами / А.С. Комшин [и др.]. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 6. С. 13-18. (0,8 п.л./0.2 п.л.)

Статьи в журналах, входящих в РИНЦ:

20. Комшин А.С., Киселев М.И., Сырицкий А.Б. Внедрение измерительно-вычислительных комплексов сопровождения жизненного цикла металлообрабатывающего оборудования и инструмента на основе фазохронометрического метода // Станкоинструмент. 2015. №1. С. 89-96. (0,9 п.л./0.3 п.л.)

21. Комшин А.С. Научные основы измерительно-вычислительных фазохронометрических технологий поддержки жизненного цикла объектов машиностроения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. №11. С. 30 - 33. (0,5 п.л.)

22. Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента // Мир измерений. 2014. № 12. С. 3-9. (0,9 п.л./0.45 п.л.)

23. Мониторинг технических и природных объектов: инженерное и метрологическое обеспечение / [А.С. Комшин и др.]. Мир измерений. 2014. № 8. С. 49-56. (1,2 п.л./0.15 п.л.)

24. Фазохронометрия открывает новые возможности диагностики редукторов / А.С. Комшин [и др.]. Промышленный транспорт XXI век. 2016. №5. С. 38-44. (1,0 п.л./0.25 п.л.)

25. Комшин А.С. Фазохронометрический метод диагностики состояния металлорежущих станков // Ритм. 2012. №10 (78). С. 34-37. (0,75 п.л.)

Патенты:

26. Блок измерительный: патент на полезную модель №131167 РФ / Пронякин В.И., Киселев М.И., **Комшин А.С.**, Кудрявцев Е.А. Заяв. 2012142488/28, 05.10.2012. Опубликовано: 10.08.2013 Бюл. № 22.

27. Устройство диагностики буксового подшипника качения: патент на полезную модель №134886 РФ / Атаманов В.Н., Пронякин В.И., Киселев М.И., **Комшин А.С.**, Кудрявцев Е.А. и др. Заяв. 2013138468/11, 19.08.2013. Опубликовано: 21.11.2013. Бюл. № 33.

28. Способ (варианты) и устройство диагностики подшипника качения: патент на изобретение №2536797 РФ / Пронякин В.И., Киселев М.И., **Комшин А.С.**, Кудрявцев Е.А. Заяв. 2012145407/28, 25.10.2012. Опубликовано: 27.12.2014. Бюл. № 36.

29. Способ диагностирования циклических машин - металлорежущих станков фазохронометрическим методом: патент на изобретение №2561236 РФ / **Комшин А.С.**, Потапов К.Г., Сырицкий А.Б., Пронякин В.И., Киселев М.И. Заяв. 2013158894/28, 30.12.2013. Опубликовано: 27.08.2015. Бюл. № 24.

30. Конструктивная схема - 1 редуктора с индукционными датчиками контроля износа зубьев зубчатых колес: патент на полезную модель № 162935 РФ / Кудрявцев Е.А., **Комшин А.С.**, Киселев М.И., Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Заяв. 2015157097/28, 30.12.2015. Опубликовано: 27.06.2016. Бюл. № 18.

Другие публикации:

31. Комшин А.С. Измерительно-вычислительные фазохронометрические технологии поддержки жизненного цикла объектов машиностроения // Сборник материалов XII Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические

проблемы новой техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: НУК информатика и системы управления МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 132 – 135. (0,25 п.л.)

32. Комшин А.С. Прецизионные исследования «стареющей» колебательной системы // Сборник материалов 10-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». М.: 2008. С. 33-34. (0,15 п.л.)

33. Комшин А.С. Математическое моделирование процесса деградации конструкционных материалов деталей машин // Сборник докладов IX сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» VPB-09. С. - Пб. 2009. С. 40-42. (0,15 п.л.)

34. Комшин А.С. Моделирование процесса измерительного контроля деградации конструкционных материалов деталей машин // Сборник материалов ВНТК «Инженерно - физические проблемы новой техники». М.: 2010. С. 49 – 51. (0,15 п.л.)

35. Комшин А.С. Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем // Будущее машиностроения России: Сборник трудов 3-й Всерос. конф. молодых учен. и спец. М. 2010. С. 80-81.

36. Комшин А.С. Оценка эквивалентности результатов измерений гауссовской модели при контроле турбоагрегата фазохронометрическим методом // Сборник материалов XI-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». М.: 2011. С. 181-183. (0,18 п.л.)

37. Комшин А.С. Прецизионное измерительное сопровождение турбоагрегатов фазохронометрическим методом // Сборник материалов XI-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». М.: 2011. С. 177-180. (0,2 п.л.)

38. Комшин А.С. Метрологическое обеспечение работы металлорежущих станков фазохронометрическим методом // Сборник докладов Всероссийской научной школы «Современные технические средства диагностики металлорежущих станков». М.: 2011. С. 29-34. (0,25 п.л.)

39. Комшин А.С. Математическое моделирование металлорежущих станков при фазохронометрической диагностике // Сборник материалов X-го Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники». М.: 2012. С. 125-128. (0,25 п.л.)

40. Комшин А.С. Регистрация быстропротекающих и медленно протекающих процессов в турбоагрегатах фазохронометрическим методом // Сборник материалов X-го Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники». М.: 2012. С. 129-132. (0,2 п.л.)

41. Комшин А.С. Информационно-метрологическое сопровождение и диагностика металлорежущих станков фазохронометрическим методом // Сборник трудов пятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М. 2012. С 59 - 62. (0,2 п.л.)

42. Виноградов Д.В., Гриненко Г.А, Комшин А.С. Изучение нанорельефа поверхностей сменных многогранных пластин // Инженерный вестник. Электронный журнал. Эл. №ФС 77-48211/500269. <http://engbul.bmstu.ru/doc/500269.html>. 2012. №11. (1,2 п.л./0,4 п.л.)

43. Комшин А.С. Измерительно-вычислительное сопровождение и диагностика электромеханических систем энергетики фазохронометрическим методом // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы

обеспечения эффективности и надежности в энергетике». С.-Петербург: 2013. С. 31-38. (0,45 п.л.)

44. Комшин А.С., Тумакова Е.В. Фазохронометрическая технология информационно-метрологического сопровождения синхронных электромеханических систем // Труды XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и специалистов. М. 2014. С 215 – 219. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

45. Комшин А.С. Применение измерительно-вычислительных технологий для сопровождения объектов машиностроения // Сборник трудов Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М. 2014. С 59 – 62. (0,15 п.л.)

46. Комшин А.С. Измерительно-вычислительные технологии диагностики и повышения эффективности эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента // Труды Международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении». С.-Пб.: Изд-во Политехнического Университета, 2014. С. 398-411. (0,8 п.л.)

47. Комшин А.С. Информационно-метрологическое обеспечение энергетики // Сборник материалов XI-го Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники». М.: 2014. С. 85-88. (0,3 п.л.)

48. Комшин А.С. Метрологическое обеспечение диагностики турбоагрегатов фазохронометрическим методом // Сборник 11 сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». 2013. С. 142-145. (0,4 п.л.)

49. Киселев М.И., Комшин А.С., Хасанов Б.И. Математическое моделирование гидроагрегата с позиции фазохронометрической диагностики // Сборник 11 сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». 2013. С. 71-76. (0,5 п.л./0,16 п.л.)

50. Комшин А.С., Орлова С.Р. Контроль деградации параметров конструкционных материалов в процессе эксплуатации // Сборник материалов XIII-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». М.: 2015. С. 241-244. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

51. Комшин А.С. Внедрение фазохронометрических систем и их испытания в промышленной эксплуатации // Сборник материалов XIII-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений». М.: 2015. С. 245-248. (0,35 п.л.)

52. Комшин А.С. Измерение деградации свойств конструкционных материалов в процессе эксплуатации объектов машиностроения // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении». М.: 2015. С. 323-327. (0,4 п.л.)

53. Комшин А.С. Внедрение технологий информационно-метрологического сопровождения эксплуатации объектов машиностроения // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2015». Казань. 2015. С. 128 – 132. (0,45 п.л.)

54. Комшин А.С., Ружицкая Д.Д. Обеспечение эксплуатации и диагностика подшипников качения объектов машиностроения // Труды XXVII Международной

инновационно - ориентированной конференции молодых ученых и специалистов. М.: 2015. С 28 – 30. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

55. Комшин А.С. Измерительно-вычислительные фазохронометрические технологии поддержки жизненного цикла объектов машиностроения // Сборник материалов XII-го Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники», 20-22 апреля 2016. М.: 2016. С. 132-135. (0,3 п.л.)

56. Игнатов А.В., Комшин А.С. Внедрение современных методов измерительного контроля клеевых соединений в машиностроение // Сборник трудов Второй Международной научно-технической конференции «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии». Дзержинск: 2016. С. 111-114. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

57. Тумакова Е.В., Комшин А.С. Внедрение измерительных фазохронометрических технологий в машиностроение // Труды Международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении (МТЕТ-2016)». С.-Пб.: 2016. С. 161-165. (0,5 п.л./0,25 п.л.)