

На правах рукописи
УДК 006.91;621.002.56

ПРОНЯКИН ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ

**ИНФОРМАЦИОННО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАШИН И МЕХАНИЗМОВ НА БАЗЕ
ПРЕЦИЗИОННОГО ХРОНОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ФАЗЫ РАБОЧЕГО ЦИКЛА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение



Москва - 2010

2
Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Телешевский Владимир Ильич

заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Сергеев Алексей Георгиевич

доктор технических наук, профессор
Обухов Игорь Васильевич

Ведущая организация – ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт метрологической службы»

Защита диссертации состоится « 25 » февраля 2010 года на заседании диссер-
тационного совета Д212.141.18 в Московском государственном техническом уни-
верситете 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.

Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан «15.» января 2010 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.141.18
д.т.н., профессор

 Цветков Ю.Б.

См. ксер



1001
1001

Актуальность. Надёжная оценка, прогноз технического состояния и аварийная защита технических объектов превращаются в проблему национального масштаба, так как страна вступила в полосу технических аварий и техногенных катастроф. Особенно острое положение сложилось в энергетике и на всех видах транспорта, где без необходимого пополнения парка действующего оборудования его ресурс приближается к исчерпанию. Достаточно отметить техногенные катастрофы на Каширской ГРЭС в октябре 2002 года, Рефтинской ГРЭС в декабре 2007, Саяно-Шушенской ГЭС в августе 2009 г. года и постоянные аварии авиационной техники (в частности вертолётов), сопровождающиеся человеческими жертвами.

Решение проблемы обеспечения надёжности и долговечности машин и механизмов не найдено. Средства и методы, применяющиеся при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации, обладают чрезмерной погрешностью (0,01% - 5%) и не гарантируют раннего предупреждения об авариях. По той же причине оказалось недостаточной их разрешающая способность, не позволяющая различать индивидуальные особенности отдельных однотипных технических объектов, регистрировать эволюцию износа их конструктивных элементов и деградацию конструкционных материалов. В связи с этим, на традиционных принципах не удалось создать эффективные компактные встроенные контрольно-диагностические системы.

Между тем, точность измерений в фундаментальных научных (и при этом не только в лабораторных условиях) исследованиях опережает на много порядков уровень точности, достигнутый в машиностроении.

Техническая реализация фундаментальных достижений естественных наук уже во второй половине XX-го века обеспечила снижение относительных погрешностей измерений расстояний в космическом пространстве до уровня 10^{-10} %, а в «стерильных лабораторных условиях» – до 10^{-15} %. В то же время уровень относительных погрешностей линейных измерений при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации объектов машиностроения не опускается ниже ($10^{-1} \div 10^{-2}$)%. Столь резкий контраст уровня метрологического обеспечения научных исследований с одной стороны и индустриально-промышленного производства – с другой отражает реально сложившееся положение в современной техники, для которой характерны:

- неопределенность информации как об исходных значениях параметров конструкционных материалов порядка ($1 \div 10$)% от их номинальных значений, так и об их изменениях в процессе эксплуатации техники;

- отсутствие компактных встроенных информационно-измерительных систем, способных обеспечить безразборную диагностику функционирующих сложных систем, оценку их технического состояния и остаточного ресурса.

Прямыми следствиями этого является необходимость:

- соблюдения кратных запасов прочности, что влечет кратное изменение удельных габаритно-массовых характеристик конструкций, повышение их материало- и металлоемкости;

- тщательной и длительной экспериментальной опытно-конструкторской, конструкторско-технологической и опытно-промышленной отработки каждого изделия.

При этом обеспечение и надёжности работы машин и механизмов достигается благодаря применению системы регламентных профилактических осмотров по плано-

во-предупредительных ремонтов с возможностью замены исчерпывающих свой ресурс и выводимых из эксплуатации объектов новыми.

В настоящее время ресурс основных фондов отечественной техники в энергетике и на транспорте, в обрабатывающей и добывающей промышленности исчерпан или близок к исчерпанию. Система планово-предупредительных ремонтов при наблюдающемся снижении поставок новой техники взамен близкой к аварийным отказам теряет свою эффективность.

Отечественные контрольно-диагностические средства и методы, основанные преимущественно на амплитудных, главным образом, виброакустических подходах, не обеспечивают в полной мере информационно-метрологическое обеспечение жизненного цикла машиностроительной продукции при разработке, изготовлении, эксплуатации и ремонте. В настоящее время в промышленности и на транспорте преобладает аналоговая контрольно-измерительная аппаратура низкой и средней точности, оцифровка показаний которой не приводит к радикальному повышению точности. Отсутствуют инструментальные средства, обеспечивающие единство представления информации на всех этапах жизненного цикла изделия, то есть отсутствует единое представление экспериментальной информации, необходимой для её передачи с этапа эксплуатации в КБ и на производство. Недостаточно и оперативное математическое обеспечение современного промышленного производства, так как математические модели функционирования изделий не учитывают многих возникающих динамических эффектов, не обеспечены инструментальными средствами идентификации, опираются на экспериментальные данные низкой и средней точности, не могут служить надёжной основой САПР. Положение усугубляется возрастанием вероятности аварий на транспорте и в энергетике в связи с увеличением физического старения и износа оборудования и недостаточностью его возобновления.

В наиболее широко распространённой вибродиагностике основой получения информации являются виброволновые процессы, возникающие при взаимодействии частей устройства. Из-за погрешностей изготовления возникают вибрации, значительно превышающие виброволновые процессы от зарождающихся дефектов. В связи с приработкой, износом, изменением режимов работы, условий эксплуатации и деградацией технической системы происходит неизбежное изменение параметров колебательных процессов, исключающее наличие устойчивых во времени диагностических признаков. Проблема использования спектров колебательных процессов, дающих основную диагностическую информацию, заключается в том, что их структура со временем радикально изменяется (особенно на длительных интервалах эксплуатации), и поэтому их использование для получения трендов и прогноза не даёт надёжных результатов.

В современных условиях необходимы методы и информационно-измерительные системы, обеспечивающие оперативную регистрацию процессов деградации и обнаружения зарождающихся дефектов функционирующих объектов, обеспечивающих диагностику и аварийную защиту. Остаётся нерешённой проблема информационного обмена между этапами жизненного цикла, особенно от этапа эксплуатации, где информация минимизирована в целях снижения затрат. Не обеспечена эффективная диагностика малооборотных и тихоходных механизмов, изделий точной механики, имеющих низкий уровень вибрации, высокооборотных систем с распределенной массой и др. (например, ГТД различного назначения). Задача перехода к ре-

монту по оценке текущего технического состояния объекта в авиации, наземном транспорте, теплоэнергетике, гидроэнергетике поставлена уже не первое десятилетие, но до сих пор не решена.

Цель работы

Создание методов и средств информационно-метрологического сопровождения жизненного цикла машин и механизмов в едином формате контролируемых метрологических характеристик на основе рекордной стабильности используемых технических средств современной отечественной хронометрии и преимуществ фазового метода

Научная новизна

1. Впервые разработаны научные основы информационно-метрологического сопровождения жизненного цикла машин и механизмов на базе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла в едином формате контролируемых метрологических характеристик.

2. Впервые разработаны общие принципы и методологические основы исследования, диагностики и аварийной защиты циклических машин и механизмов фазохронометрическим методом.

3. Разработаны общие принципы математического моделирования машин и механизмов для применения на всех этапах жизненного цикла в фазохронометрическом представлении.

4. На основе фазохронометрического подхода разработаны единые принципы проектирования фазохронометрических измерительных систем для исследования, диагностики и аварийной защиты машин и механизмов.

5. На базе фазохронометрического подхода разработаны научные, теоретические и методологические основы

- создания новых средств и методов оценки технического состояния функционирующих турбоагрегатов (ТА) большой мощности,

- измерительно-вычислительного мониторинга текущего технического состояния и аварийной защиты функционирующих синхронных генераторов большой мощности,

- исследования и диагностики двигателей внутреннего сгорания,

- исследования и диагностики часовых механизмов.

Значимость

1. Достигнутая чувствительность фазохронометрических систем реализует выявление зарождающихся дефектов, что недоступно традиционным методам диагностики (в частности, вибродиагностике).

2. Разработан проект информационно-метрологического сопровождения, диагностики и аварийной защиты ТА и вспомогательного оборудования ТЭЦ, обеспечивающий переход от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов на основе оценки текущего технического состояния, эффективность которого подтверждена технико-экономическим обоснованием составит в прогнозных ценах (дисконтированный по ставке 11%) в виде чистого приведенного дохода – 970 млн. руб. при сроке окупаемости – 4 года.

3. Разработан проект информационно-метрологического сопровождения, диагностики и аварийной защиты гидроагрегатов ГЭС на базе тестовой и функциональной диагностики, обеспечивающий переход от системы планово-предупре-

дательных ремонтов к системе ремонтов на основе оценки текущего технического состояния. Эффективность проекта подтверждена технико-экономическим обоснованием, разработанным в соответствии с требованиями ОАО «РусГидро». Экономический эффект только для гидроагрегатов Волжской ГЭС при номинальных инвестициях в 300 млн. руб. (в прогнозных ценах - 335 млн. руб.) приведенный доход первого проекта (в прогнозных ценах) составит 708 млн. руб.

4. Достигнутая относительная погрешность определения периода вращения валопровода ТА ТЭЦ $5 \cdot 10^{-4} \%$ позволила реализовать регистрацию его крутильных колебаний, возбуждаемых изменениями нагрузки и управляющих воздействий, которые считаются одной из основных причин накопления усталости в металле валопровода и аварийного трещинообразования в нём. Технология измерения параметров крутильных колебаний валопровода ТА в энергетике отсутствует.

5. Фазохронометрические системы выполняют регистрацию быстропротекающих процессов и в сотни раз более оперативны, чем штатные средства ТЭЦ, что обеспечивает новый уровень аварийной защиты ТА.

6. Разработан систематический безразборный измерительный контроль частотных характеристик и диагностика функционирующих синхронных генераторов Единой энергетической системы в рабочих режимах, не имеющий аналогов в мире (подтверждено патентом).

7. Разработаны методы и средства диагностики циклических механизмов (например, часовые механизмы, турбоагрегаты, гидроагрегаты, газотурбинные двигатели, ДВС, электродвигатели, редукторы, подшипники и др.), значительно сокращающие цикл испытаний для подтверждения их работоспособности.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Фазохронометрический метод исследования и диагностики на базе прецизионного хронометрического анализа фазы рабочего цикла обеспечивает информационно-метрологическое сопровождение жизненного цикла машин и механизмов в едином формате контролируемых метрологических характеристик.

2. Математическое моделирование циклических механизмов в фазохронометрическом представлении обеспечивает внедрение математических методов непосредственно в процесс разработки, изготовления и эксплуатации машин и механизмов.

3. Фазохронометрическая информация обеспечивает измерительно-вычислительный прогнозирующий мониторинг, диагностику текущего технического состояния и аварийную защиту турбоагрегатов и вспомогательного оборудования ТЭЦ.

4. Быстродействие ФХС и математическая обработка экспериментальных данных обеспечивают аварийную защиту и прогноз технического состояния машин и механизмов.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлены корректностью применения математического аппарата и вычислительных методов, опорой на метрологически корректное получение и использование экспериментальных данных, привязкой средств измерений к Государственной системе поверки времени и частоты, контролем уровня погрешностей измерений и вычислений на всех стадиях создания и применения фазохронометрических систем.

Апробация результатов диссертации

Положения и результаты работы были доложены и обсуждены на следующих

научно-технических конференциях и совещаниях-семинарах:

- Всесоюзная научно-техническая конференция «Волновые и вибрационные процессы в машиностроении», г. Горький, 1984, 1985, 1989 г.г.;
- VI Всесоюзная школа «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики», г. Горький, 1986 г.;
- 5-я Всесоюзная научно-техническая конференция «Фотометрия и её метрологическое обеспечение», 1984 г.;
- 12-я Всесоюзная научно-техническая конференция «Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропротекающих процессов», 1985 г.;
- Всесоюзное совещание-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники», 1990, 1992, 1996, 1998, 2001, 2003, 2004, 2006. г.г.;
- научно-техническая конференция «Состояние и проблемы технических измерений», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997, 1998, 2000, 2002, 2004, 2008 г.г.;
- Международная научно-техническая конференция «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники» (Чкаловские чтения): Егорьевск Московская область, 1995, 1997, 1999, 2002, 2004, 2007 г.г.;
- конференция «Проблемы машиноведения», НФ ИМАШ РАН, Н. Новгород, 1997, 2001, 2006 г.г.;
- Научная школа: Фундаментальные проблемы и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем («Фридлиндеровские чтения»), Санкт-Петербург, ИПМ, 2002, 2005, 2007, 2009 г.г.;
- труды академических чтений по космонавтике. Чкаловские чтения. 2004г.
- Всероссийский научно-технический семинар «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» 2005, 2007 г.г.;
- вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Методы и средства измерений электрических величин», г. Суздаль, 2009.

Публикации по результатам работы. По результатам выполненных исследований опубликованы 86 работ, в том числе, 25 статей в научно-технических журналах, в журналах по списку ВАК – 13 статей, 50 тезисов докладов на научно-технических конференциях. Получены патент и два авторских свидетельства на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, списка условных обозначений и сокращений, общей характеристики работы, 5 глав, выводов, списка использованных источников и 2 приложений. Работа содержит 287 страницы, из них рисунки на 53 страницах, таблицы на 4 страницах, 20 страниц списка литературных источников. Приложения на 48 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены её цели и задачи, указана научная новизна и практическая полезность, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Информационно-метрологические проблемы жизненного цикла машин и механизмов

Глава посвящена анализу информационно-метрологических проблем жизненного цикла машин и механизмов, из которого следует, что закономерно сложившийся в 30-е годы прошлого века общий уровень технологического обеспечения массового производства машин определил подход к его информационно-метрологическому обеспечению. В результате возникла система планово-предупредительных ремонтов и регламентных профилактических работ. Эта система в основном удовлетворяла промышленность страны, пока парк находившихся в эксплуатации машин заменялся новым оборудованием. Положение резко изменилось в последние годы, когда объёмы и темпы возобновляющих поставок промышленностью образцов новой техники резко сократились. Особенно серьёзное положение сложилось в энергетике и на транспорте, где всё больше число технических объектов продолжает эксплуатироваться, несмотря на исчерпание их ресурса. Поэтому всё больше нарастают признаки вступления страны в полосу крупномасштабных технических аварий и техногенных катастроф. В этих условиях интегральные показатели надёжности и долговечности объектов теряют какую-либо значимость. На первый план выступает необходимость прогноза судьбы каждого конкретного технического объекта. В связи с этим проблемы «персонального» информационно-метрологического сопровождения функционирующего объекта приобретает чрезвычайную важность.

Традиционно научно-исследовательское, техническое и метрологическое оснащение каждого этапа жизненного цикла изделия (разработка, изготовление, испытания, доводка, эксплуатация и ремонт) является практически индивидуальным. Отсутствует единство представления информации на этапах жизненного цикла. В целях снижения затрат на этапе эксплуатации объём измерительной информации о техническом состоянии объекта сводят, как правило, к минимуму.

В настоящее время в промышленности и на транспорте преобладает контрольно-измерительная аппаратура низкой и средней точности. Основным объектом исследования при оценке функционирования объектов является исследование вибро-волновых процессов в машинах и механизмах (вибродиагностика). Но она контролирует в процессе эксплуатации только наступление предельных состояний конструкции и её элементов и не обеспечивает надёжную оценку текущего технического состояния для многих объектов (например, турбоагрегаты, гидроагрегаты, малооборотные и тихоходные механизмы, изделия точной механики, имеющие низкую вибрацию, высокооборотные системы с распределённой массой и др.). В процессе выработки ресурса виброакустические параметры постепенно изменяются, что значительно усложняет оценку технического состояния объекта.

Машины и механизмы из-за погрешностей изготовления обладают виброактивностью. В процессе их работы возбуждаются характерные вибрации, значительно превышающие уровень сигналов от зарождающихся дефектов. В связи с работой, износом, изменением режимов работы, условий эксплуатации и деграда-

цией технической системы происходит неизбежное изменение параметров колебательных процессов, исключающее наличие устойчивых во времени диагностических признаков. Поэтому устанавливаются предельные значения параметров вибрации конструкции. Это, как правило, уровни и пороги. В связи с этим для сложных изделий возникает необходимость адаптации виброакустических средств для следующего серийного образца. Проблема использования спектров колебательных процессов, дающих основную диагностическую информацию, заключается в том, что их структура со временем радикально изменяется и поэтому использование их для получения трендов и надёжного прогноза не даёт надёжных результатов. Отсутствует возможность их сравнения на длительных отрезках эксплуатации и для выявления признаков, характеризующих эволюцию устройства и его технического состояния.

Параметры сигнала, содержащие информацию о зарождающихся дефектах, имеют малую энергоёмкость в условиях слабой помехозащищённости полезной информации. Амплитудные методы, в том числе и вибродиагностика, не обеспечивают получение информации для оценки взаимодействия отдельных составных частей и элементов механизма.

В настоящее время в условиях резкого сокращения объёма выпуска новой продукции во всех отраслях машиностроения выяснилась неизбежность работы на изношенных технических объектах различного назначения, выработавшем свой установленный ресурс. В этих условиях для безаварийной, рациональной и экономически обоснованной эксплуатации машин и механизмов необходимо обеспечить

- диагностику текущего технического состояния серийного объекта,
- прогнозирующий мониторинг безаварийной работы устройства,
- переход от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов в соответствии с текущим техническим состоянием,
- научно обоснованную оценку остаточного ресурса,
- надёжную аварийную защиту.

Данные проблемы для сложных технических систем (например, турбоагрегаты, гидроагрегаты, газотурбинные двигатели и др.) до настоящего времени не решены и это подтверждает вся практика создания и эксплуатации продукции машиностроения.

Очевидно, что соблюдение только взаимозаменяемости по геометрическим параметрам деталей и сборочных единиц оказывается недостаточным для обеспечения оптимального функционирования изделия. При эксплуатации изделий выявляется важность соблюдения не только геометрической, но и динамической совместности конструктивных элементов. Исходное состояние объекта уже обладает некоторой неопределённостью, порождаемой «взаимодействием» полей допусков, неизбежностью отклонения от заданных значений геометрических параметров, определяющих размеры, форму и расположение конструктивных элементов, а также неопределённостью физико-механических характеристик. В результате присутствия зоны неопределённости параметров работоспособность и надёжность изделия достигается большим объемом конструкторских и технологических работ, применением всего накопленного ранее производственного опыта и длительными стендовыми и натурными испытаниями. Для достижения динамической совместности элементов механизма необходима подробная информация о поведении машин и механизмов и об эволюции геометрических и физико-механических параметров деталей и сборочных единиц. В

связи с этим встает проблема прецизионного изучения функционирующих устройств с помощью как натурного, так и многофакторного вычислительного эксперимента на основе уточняемых математических моделей, учитывающих также изменения параметров в процессе эксплуатации. При эксплуатации изделия вступает в силу принципиально неустраняемый фактор времени, проявляющийся в износе деталей и деградации их материалов. В связи с этим возрастает острота проблемы оценки текущего технического состояния, прогноза и аварийной защиты изделия.

Между тем, уровень точности, достигнутый в современном машиностроении и тенденции его повышения целесообразно оценивать не изолированно на его собственной базе, а в сопоставлении с достижениями в других отраслях науки и техники. Например, в астрометрии достигнута относительная погрешность измерений линейных параметров орбит порядка $10^{-9} - 10^{-10}$ ($10^{-7}\% - 10^{-8}\%$).

Различные отрасли машиностроения, безусловно, различаются по уровню точности. Однако результирующая относительная неопределенность характерных геометрических параметров механических и электромеханических систем – объектов машиностроения (например, турбоагрегатов) и приборостроения (например – гироскопов) слабо зависит от их размеров и имеет порядок $(0,05 - 0,1)\%$. Достигнутая относительная точность геометрии механических систем в целом соответствует и уровню научных знаний, как на макро-, так и на микроуровне, и отражает достигнутый уровень их надежности и качества. Безусловно, в передовых отраслях техники – атомной, аэрокосмической и других этот показатель выше, что характерно, например, для теплоэлектроэнергетики и наземного транспорта.

В главе показано, что отечественные контрольно-диагностические средства и методы не обеспечивают в полной мере информационно-метрологическое сопровождение жизненного цикла машиностроительной продукции, оперативную оценку текущего технического состояния изделий машиностроения и приборостроения и учёта фактора времени.

В настоящее время невозможно найти науки и проблемы, в которых не возникли бы вопросы, связанные с проблемой времени. Данное рассмотрение в технике связано с присутствием времени как параметра, присутствующего во всех этапах жизненного цикла машин и механизмов (разработка, изготовление, эксплуатация и ремонт).

Традиция философского анализа понятия времени имеет тысячелетнюю историю и восходит к именам Гераклита, Демокрита, Платона, Аристотеля, Лейбница, Ньютона, Гегеля, а затем к Эйнштейну и Пригожину. В любой из наук можно обнаружить комплексы вопросов, исчерпывающие ответы на которые могут быть даны лишь при наличии ясных представлений о сущности и природе времени. Эти вопросы имеют самое непосредственное отношение к новейшему этапу развития современной научной мысли, к преодолению имеющихся трудностей.

Время - одно из наиболее ёмких и многоплановых понятий науки, пронизывающих её от фундаментальных первооснов до конкретных отраслей. Являясь физической величиной, оно служит количественной мерой изменения состояния различных систем, в том числе, технических, и выступает при этом или в качестве динамической переменной или параметра, характеризующего эволюцию системы, её необратимые изменения и деградацию. Вместе с тем, потенциальные возможности использования времени для изучения поведения технических систем, оценки и про-

гноза их состояния ещё в полной мере не использованы. Одна из причин этого - недостаточно высокий уровень применения достижений хронометрии в условиях производства и эксплуатации промышленной продукции.

Надежность и долговечность машин и механизмов в наибольшей степени определяется сопровождающими их функционирование динамическими эффектами (виброактивность, трение, цикловая усталость, температурные и механические воздействия и т.п.), которые проявляются только в рабочих режимах. Для оценки их влияния наибольший практический интерес представляет определение текущего технического состояния функционирующих машин и механизмов и обеспечение их аварийной защиты. Принципиально неустранимый фактор времени обнаруживается еще на стадиях заготовительных операций (например, благодаря влиянию предыстории конструкционных материалов, износу обрабатывающего инструмента, нестабильности энергопитания) и проявляется во все большей степени по мере возрастания продолжительности эксплуатации изделия (деградация параметров, неравномерность износа и т. п.).

Необходимость повышения уровня информационно-метрологического сопровождения продукции требует повышение метрологического уровня применяемых средств контроля и диагностики, которое достигается за счёт передачи достижений фундаментальных наук в машиностроение. Одним из таких перспективных направлений является применение методов и средств хронометрии для оценки и прогноза технического состояния машин и механизмов.

Проведенные исследования изделий машиностроения и приборостроения с применением новой фазохронометрической информационной технологии на основе рекордной стабильности технических средств современной отечественной хронометрии обеспечили получение принципиально новой информации о машинах и механизмах, что представлено в следующих главах диссертации.

Анализ и практика состояния информационно-метрологического обеспечения этапов жизненного цикла промышленного изделия показали перспективность применения методов и средств хронометрии для оценки и прогноза его технического состояния, а также целесообразность разработки новых способов включения времени и частоты в состав физических величин, необходимых при реализации измерительного контроля и диагностики машин и механизмов. Определенный опыт использования интервалов времени в качестве диагностического параметра в технике уже имеется.

Глава 2. Фазохронометрический метод информационно-метрологического сопровождения циклических машин и механизмов

Во второй главе изложено описание фазохронометрического метода информационно-метрологического сопровождения циклических машин и механизмов и рассмотрен комплекс его составных частей.

Объект исследования - рабочий цикл машин и механизмов является наиболее устойчивым процессом любой технической системы на протяжении всего жизненного цикла от разработки до эксплуатации и все технические мероприятия направлены на поддержание его параметров. Неоднородность рабочего цикла на заданном мерном интервале регистрируется фазохронометрическими средствами измерений, так как они значительно стабильней. Изменения в работе серийного механизма вызываются наличием допусков, взаимодействием его элементов, дефицитом

смазки, локальными дефектами и износом, перекосами, и т.п. и имеют индивидуальные наблюдаемые количественные параметры.

Возможности широко применяемых методов исследования и оценки технического состояния объекта зависят от используемых физических эффектов (виброакустических, тепловых, электродинамических и др.), проявляющихся только в процессе работы, а сам рабочий цикл контролируется на соответствие установленным параметрам. При фазохронометрическом подходе контролируются характеристики движения деталей и частей устройства при осуществлении ими рабочего цикла, а в качестве основного информационного параметра используются интервалы времени, соответствующие движению элементов механизма между фазами рабочего цикла.

Подход к исследованию рабочего цикла – фазовый метод. Известно, что эффективность решения теоретических задач существенно зависит и от выбора системы координат. Так, для технических систем, в частности, механических и электромеханических устройств циклического действия наиболее информативной координатой является полярный угол радиус-вектора точки, изображающей на фазовой плоскости состояние циклической системы. В отсутствии возмущений траектория этой точки образует за время полного цикла замкнутый контур (рис. 1). Площадь участка фазовой плоскости, заключённого 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. Динамические свойства циклических систем при достаточно высоких энергиях (то есть большой “площади цикла”) таковы, что податливость “площади цикла” по отношению к возмущениям гораздо ниже податливости фазы. Следовательно, обладая наибольшей чувствительностью по отношению к возмущениям, фаза цикла в этом случае является и наиболее информативной координатой.

В машинах и механизмах вследствие неизбежного разброса геометрических параметров деталей, рабочих характеристик изделия, нестабильности свойств материалов и влияния внешних воздействий происходят изменения кинематических параметров движения элементов механизма. Поэтому рабочий цикл отображается на фазовую плоскость так, что область локализации из замкнутой линии превращается в ленту конечной ширины, отражающую вариации режимов работы устройства (рис. 1).

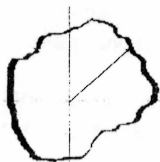


Рис.1

Таким образом, предлагаемый метод базируется на применении в качестве основного информационного параметра длительности фазы рабочего цикла. Установлено, что при малых отношениях сигнал/шум информация о сигнале известной частоты содержится в основном в его фазе.

Измерения при фазохронометрическом подходе реализуются по двум вариантам:

- квантование фазы цикла по уровню с дискретизацией по времени, включая (рис. 2)

а) равномерное квантование фазы,

б) регистрацию моментов достижения характерных заданных значений фазы или границ характерных этапов цикла,

- равномерное квантование времени с дискретизацией по уровню или фазы цикла.

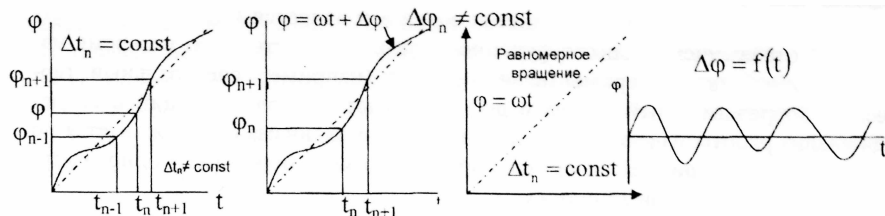


Рис. 2

Первый вариант реализуется путем нанесения на подвижные элементы циклического механизма контрастных меток, образованных резким изменением оптических или магнитных свойств (штрихами, прорезями и т.п.), а также рельефа – в виде паза или выступа. Возможна и установка дополнительных деталей типа лимбов и т.п. В измерительной системе применяются первичные преобразователи пригодные для измерений интервалов времени, например: индукционный, холловский датчик, вихретоковый, магнитные головки и др.

Второму варианту фазохронометрического подхода, основанному на равномерном квантовании времени, соответствует прецизионная стробоскопия, обеспечивающая визуальный контроль быстротекущих циклических процессов и реализацию аналога высокоскоростной съёмки с возможностью длительного наблюдения поведения и взаимодействия деталей механизма.

Таким образом, для технических систем, в частности, механических и электромеханических устройств циклического действия наиболее информативной координатой является полярный угол радиус-вектора точки, изображающей на фазовой плоскости состояние циклической системы. Фазовый метод естественно приводит к измерению интервалов времени, соответствующих характерным отрезкам рабочего цикла.

Метрологическая база фазохронометрического метода – прецизионная хронометрия. Измеряемая физическая величина – интервалы времени

Одной из особенностей фазохронометрического подхода является использование прямых последовательных прецизионных измерений для формирования временных рядов, соответствующих перемещениям основных элементов объекта (например, валопровод турбогенератора, гидротурбины, коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания (ДВС), ротор газотурбинного двигателя (ГТД), выходной вал редуктора и др.).

При исследовании работы изделия единичное измерение не дает достаточной информации для исследования, диагностики и оценки его технического состояния, поэтому для регистрации изменений в механизме требуется многократное последовательное измерение вариаций интервалов времени, соответствующих характерным отрезкам рабочего цикла. Именно в вариациях интервалов времени содержится информация о динамике взаимодействия элементов машин и механизмов. В настоящее время для фазохронометрических систем достигнута относительная погрешность измерений интервалов времени не более $5 \cdot 10^{-4} \%$ на промышленной частоте.

Так как контролируемыми объектами являются циклические машины и механизмы, их взаимодействующие составные части и детали имеют индивидуальные рабочие циклы, влияющие на выходные параметры. То есть временной ряд содержит информацию о совокупности характеристик объекта и является интегральным метрологическим отражением процесса функционирования объекта. В то же время математическая обработка экспериментальных данных (например, спектральный, гармонический, корреляционный анализ и др.) позволяют проводить общий и элементный анализ работы изделия. Деградация свойств механизма обнаруживается по эволюции структуры вариаций интервалов времени по мере перехода от одного мерного интервала эксплуатации к другому.

Стабильность и повторяемость кинематических параметров движения элементов механизма при выполнении рабочего цикла гарантирует выявление устойчивых во времени диагностических признаков, необходимых для анализа и оценки медленно протекающих процессов, в то же время количественно индивидуальных для каждого серийного изделия.

Изменение технического состояния механизма регистрируется измерениями характерного периода (или его долей) движения конструктивных элементов механизма и математической обработкой выявляются диагностические признаки технического состояния.

Математическое моделирование в фазохронометрическом представлении.

Как показала практика исследования различных машин и механизмов, обработка результатов измерений, полученных на более высоком метрологическом уровне, выявляет принципиально новую информацию о работе механизма. Поэтому для описания поведения объекта и интерпретации экспериментальных данных выполняется разработка уточненных математических моделей, обладающих детальностью на уровне взаимодействия отдельных элементов и учитывающих индивидуальные размеры, допуски и физические параметры взаимодействующих деталей и сборочных единиц серийного экземпляра изделия, влияние внешних воздействий на работу механизма.

Основной задачей математического моделирования функционирования объекта при фазохронометрическом подходе является анализ работы устройства, установление взаимосвязи экспериментальных данных (рядов интервалов времени) с конструкцией механизма и режимами его работы, моделирование дефектов и проведение вычислительных экспериментов аварийных режимов работы, не реализуемых экспериментально. Результатом вычислительного эксперимента с применением математических моделей в фазохронометрическом представлении являются ряды интервалов времени, обрабатываемые с использованием прикладных программ для экспериментальных данных. Это позволяет значительно ускорить идентификацию математической модели с реальным объектом и детально изучать особенности его работы. Математическая модель в фазохронометрическом представлении внедряется непосредственно в процесс разработки, изготовления испытания, эксплуатации и ремонта изделия.

Единый формат представления информации. Измерительная информация на базе прецизионной хронометрии имеет единую структуру (интервал времени), а, следовательно, методически единые подходы в обработке результатов измерений. Это позволяет получить информационную базу экспериментальных данных для всех этапов жизненного цикла устройства в едином метрологическом формате. Тем са-

мым все этапы жизненного цикла методически связываются в единое целое, а накопленная информация на различных этапах при появлении новых методов математической обработки может неоднократно анализироваться в целях усовершенствования конструкции. Современные возможности вычислительной техники практически не ограничивают объём регистрируемой информации. Это позволит при установке фазохронометрических систем (ФХС) на объекты включить все этапы жизненного цикла в процесс непрерывного совершенствования и отработки конструкции с передачей информации с объекта (например, вертолёт, турбоагрегат, гидроагрегат, двигателя внутреннего сгорания, газотурбинного двигателя и др.) в центры контроля, конструкторские бюро и заводы. Результаты измерений, хранящиеся в базе данных, сопровождающей изделие, при необходимости могут многократно использоваться для анализа этапов жизненного цикла изделия, в том числе при появлении новых математических моделей и методов обработки экспериментальных данных. Тем самым фазохронометрическое информационно-метрологическое сопровождение связывает методически все этапы жизненного цикла в единое целое.

Возможности фазохронометрического метода в исследовании и диагностике машин и механизмов. Обеспечиваются прецизионными измерениями интервалов времени (относительная погрешность не более $5 \cdot 10^{-4} \%$ на промышленной частоте), применением математических моделей и пространственно-временной взаимосвязью экспериментальных данных с рабочим циклом и конструкцией изделия. Этот комплекс позволяет связать параметры движения элементов с фазами рабочего цикла и их пространственно-временным положением в механизме, что обеспечивает эффективное применение ФХС в сочетании с различными методами исследования для получения информации.

На базе фазохронометрического подхода на этапах жизненного цикла изделия решаются, например, следующие задачи:

На этапе разработки и испытаний изделий выполняется определение критериев правильного функционирования изделия, при испытании макетов осуществляется выбор оптимальных вариантов элементов и узлов конструкции, предпочтительных марок конструкционных материалов, оценка функционирования изделия при влиянии внешних воздействий и других факторов. Разрабатываются математические модели в хронометрическом представлении, являющиеся в дальнейшем основой для разработки САПР изделия, его диагностики.

На этапе изготовления изделия на базе фазохронометрирования осуществляется оценка функционирования объекта, контроль качества изделия и комплексная оценка технологии производства на базе математического моделирования, входной и выходной контроль комплектующих изделий, обеспечение сертификационных испытаний и др.

На этапе эксплуатации фазохронометрический метод позволяет реализовать диагностику текущего технического состояния серийного объекта, прогнозирующий мониторинг безаварийной работы устройства, переход от системы планово-предупредительных ремонтов к системе ремонтов в соответствии с текущим техническим состоянием, научно обоснованную оценку остаточного ресурса, надёжную аварийную защиту и др. Также реализуется передача информации о техническом со-

стоянии и работе изделия на этапы разработки и производства для совершенствования конструкции и технологических процессов.

Глава 3. Метрологическое обеспечение фазохронометрических систем

Для сложных технических систем важно обеспечить непрерывное информационно-метрологическое сопровождение в условиях эксплуатации для обеспечения аварийной защиты, диагностики и управления. Встроенные фазохронометрические системы функционируют в сложных условиях, определяемых

- необходимостью обеспечения относительной погрешности $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ % от номинальной длительности рабочего цикла функционирующего механизма,
- влиянием неконтролируемых воздействий на объект в процессе эксплуатации (различные поля и механические воздействия),
- необходимостью исключения потери метрологической информации в каналах аварийной защиты в процессе эксплуатации.

При нормировании погрешностей и определении межповерочных интервалов для измерительных каналов необходимо учитывать влияние условий эксплуатации и внешних воздействий, что представляет большую сложность. В зависимости от условий эксплуатации погрешности средства измерения могут значительно изменяться. В связи с этим возникает необходимость анализа воздействий влияющих факторов и назначения индивидуального межповерочного интервала для каждого измерительного канала.

На метрологические характеристики средства измерения влияют:

- деградация СИ в условиях эксплуатации,
- внешние воздействия на компоненты СИ,
- быстропротекающие процессы в компонентах измерительного канала.

В настоящее время эти проблемы решаются на базе поверочного интервала, который определяется на основе математических моделей максимально учитывающих погрешности, помехи, условия эксплуатации, влияние внешних воздействий, при полной информации об СИ. В данном случае требуется оперативный учёт изменяющихся условий, что представляет большую сложность.

Для фазохронометрических систем, построенных по единой методологии для различных циклических машин и механизмов, необходим также единый минимально затратный подход в их метрологическом обеспечении.

Для ФХС, встроенных в сложные и дорогостоящие технические системы (турбоагрегаты, гидроагрегаты, ГТД, дизель-генераторы, мощные компрессоры и др.), одним из путей решения этой проблемы является сокращение межповерочного интервала до минимума, определяемого временем оценки метрологических характеристик измерительного канала. То есть выполнением непрерывной метрологической проверки метрологических характеристик измерительного канала, когда поверочный интервал определяется временем измерений и быстроедействием ЭВМ. Данный подход обеспечивает оценку метрологических характеристик практически в реальном времени и при её применении нет необходимости учитывать изменение влияющих величин и выполнять в связи с этим периодически перерасчёт поверочного интервала. То есть оценка годности измерительного канала выполняется по текущим фактическим показателям метрологических характеристик. Реализация этой процедуры осуществляется введением дополнительного измерительного канала. Тогда ра-

бочие каналы выполняют измерения и поочерёдно (или в дублированном варианте) для каждого выполняется оценка метрологических характеристик.

Данная методика реализуется при использовании тестового сигнала, процедуры многократных измерений, методов планирования измерений при оценке качества измерительной процедуры относительно дисперсии и систематической погрешности.

Алгоритмы оценки метрологических характеристик измерительного канала рассматриваются в допущении, что результат однократного измерения является случайной величиной и имеет Гауссовский закон распределения.

Результат измерения можно представить в виде

$$Y(t) = t + E(t), \quad (1)$$

где t – измеряемая величина – интервал времени), а $E(t)$ – случайная погрешность результата измерения. Случайная величина $E(t)$ должна находиться в поле допуска $0 \pm \frac{1}{2}Te$ с заданной вероятностью.

$$P\left(|E(t)| \leq \frac{1}{2}Te\right) \geq 1 - \varepsilon, \quad (2)$$

где Te – допуск поля допуска,

ε – малая величина, $\varepsilon \ll 1, \varepsilon > 0$.

Величина $E(t)$ может быть записана также в следующем виде

$$E(t) = m_e(t) + \overset{0}{E}, \quad (3)$$

где $m_e(t)$ – математическое ожидание случайной погрешности, т.е. систематическая погрешность, $\overset{0}{E}$ – центрированная случайная составляющая с дисперсией D_e .

Условие единства измерений можно записать в виде двух неравенств

$$1. D_e \leq D_e^* \quad (4)$$

$$2. m_e(t) \leq \frac{1}{2} T_{m_e}^*, \quad (5)$$

Выполнение условий (4) и (5) гарантирует выполнение условия (2).

Таким образом, рассматривая задачу оценки метрологического качества работы измерительного канала, следует решить две задачи:

1) Оценить экспериментально условие по дисперсии (4), используя результаты измерения величины t (интервал времени) тестового сигнала).

2) Оценить экспериментально условие по систематической погрешности (5) используя результаты измерения величины t (интервал времени) тестового сигнала.

Достоинством предлагаемого подхода является то, что метрологическая оценка работы измерительного канала осуществляется только с помощью проверки выполнения условий (4) и (5) без необходимости проведения подробного анализа составляющих погрешностей измерительных каналов, условий эксплуатации, внешних воздействий и др.

При равнооточных некоррелированных измерениях оценка измеряемой величины (периода следования тестового сигнала) T_T имеет вид

$$Z(t) = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^{\mu} Y_j(t), \text{ где } t=t_0 \text{ и } \mu - \text{объем измерений.}$$

Исходными данными для реализации плана измерений являются следующие характеристики фазохронометрической системы:

1) Абсолютная погрешность измерения интервалов времени ФХС $T_e = \pm 1 \cdot 10^{-7} \text{с.}$

2) Абсолютная погрешность тестового сигнала $\pm 1 \cdot 10^{-9} \text{с.}$, то есть можно принять $t \approx T_r$

3) Допущение:

Входной тестовый сигнал принимается постоянной величиной, так как измерительный канал не чувствителен к вариациям его периода.

Измерительная задача, связанная с проверкой условия $D_e \leq D_e^*$, сводится к схеме альтернативных гипотез

$$\left. \begin{array}{l} H_0 : D_e \leq D_e^* - \text{гипотеза } H_0, \\ H_1 : D_e \leq D_e^* - \text{гипотеза } H_1, \end{array} \right\} \quad (6)$$

При проверке гипотез (1) следует выбрать экспериментальную оценку дисперсии, которую можно получить только на основе многократных измерений

$$Y_j(t) = t + m_e(t) + E_j; \quad j = \overline{1, \mu}; \quad D_{E_j} = D_e - \text{const}$$

Получены зависимости для оценки дисперсии как случайной величины.

План эксперимента $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$ оценки метрологических характеристик измерительного канала реализуется в следующей последовательности:

1. Выполнение многократных измерений $y_i(t) = 1, \hat{\mu}$, где $y_i(t)$ - экспериментальные данные многократных измерений.

2. Обработка многократных измерений и экспериментальная оценка аргумента решающей функции

$$Z(t) = \frac{1}{\hat{\mu}} \sum_{j=1}^{\hat{\mu}} y_j(t) \quad (7)$$

$$s_c^2 = \frac{1}{\hat{\mu} - 1} \sum_{j=1}^{\hat{\mu}} [y_j(t) - Z(t)]^2 \quad (8)$$

3. Определение значения решающей функции

$$r(s^2) = \begin{cases} 0, & \text{если } s_c^2 \leq \hat{u}_0 - \text{принимается гипотеза } H_0, \\ 1, & \text{если } s_c^2 > \hat{u}_0 - \text{принимается гипотеза } H_1. \end{cases} \quad (9)$$

Для формирования плана эксперимента по оценке систематической погрешности по условию $m_e(t) \leq \frac{1}{2} T_m^*$ вводятся альтернативные гипотезы

$$H_0 : m_\epsilon(t) \leq \frac{1}{2} T_{m_\epsilon}^*, \quad H_1 : m_\epsilon(t) > \frac{1}{2} T_{m_\epsilon}^* . \quad (10)$$

Определён план эксперимента $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$, обеспечивающий оценку условия $|m_\epsilon(t)| \leq \frac{1}{2} T_{m_\epsilon}$ при минимальном объеме многократных измерений $\hat{\mu}$ для заданных ограничений на вероятности ошибок 1-го и 2-го рода.

Реализация плана $(t, \hat{\mu}, \hat{u}_0)$ при оценке ограничения на систематическую погрешность выполняется в следующей последовательности

1. Выполнение многократных измерений $y_j(t), j = \bar{1}, \hat{\mu}$
2. Обработка многократных измерений и определение значения аргумента решающей функции

$$z(t) = \frac{1}{\hat{\mu}} \sum_{j=1}^{\hat{\mu}} y_j(t), \quad \hat{t} = \frac{Z(t) - t_2}{\sigma_\epsilon} \sqrt{\hat{\mu}}, \quad \sigma_\epsilon = \sigma_\epsilon^*, \quad (11)$$

3. Принятие решения

$$r(|\hat{H}|) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\hat{t}| \leq \hat{u}_0 - \text{принимается гипотеза } H_0, \\ 1, & \text{если } |\hat{t}| > \hat{u}_0 - \text{принимается гипотеза } H_1. \end{cases}$$

В соответствии с вышеизложенной методикой выполняются измерения и расчет для проверки заданных метрологических характеристик измерительных каналов. Сравнение результатов расчета и обработки измерений периода следования тестовых импульсов показывает соответствие погрешности измерительных каналов по дисперсии и систематической погрешности установленному допуску. Применение данной методики позволяет проводить проверку метрологических характеристик измерительных каналов без учёта изменений условий эксплуатации и аппаратной части фазохронометрических систем.

Глава 4. Информационно-метрологическое сопровождение этапа создания циклических машин и механизмов

При всём разнообразии конструктивных особенностей машин и механизмов задачи, стоящие на этапе их создания, в основном методически совпадают и требуют решения большого числа проблем связанных с разработкой конструкции изделия и учёта влияния на него внешних воздействий. Опыт показывает, что процесс конструирования имеет сложный и неоднозначный характер. Он неразрывно связан с научными исследованиями и происходит в процессе поиска и анализа альтернативных вариантов конструктивных решений. На этом этапе выполняется большой объем исследований, испытаний, а, следовательно, и измерений, на базе которых принимаются решения о выборе оптимальных вариантов.

Как правило, для диагностики машин и механизмов используются параметры, связанные с различными физическими эффектами, сопровождающими рабочий цикл, а именно виброакустические, силовые, тепловые, движения и др. Временные параметры для роторных циклических механизмов (электродвигатели, редукторы, подшипники, ГТД, ДВС, компрессоры и др.) считаются дополнительно контролируемыми параметрами, то есть второстепенными. Принятая последовательность разработки диагностического обеспечения отталкивается из применения множества методов и

измеряемых параметров. Наиболее широко распространённым является метод сравнения результатов обработки экспериментальных данных с эталонными характеристиками и зависимостями параметров от времени, полученными на натурных испытаниях и начальных стадиях эксплуатации нового изделия.

Для обеспечения работоспособности и надёжности мало обеспечить геометрическую совместимость деталей и узлов. Необходимо иметь методы и средства оценки оптимального функционирования механизма и функциональную обратную связь с технологическими процессами изготовления.

Обоснование выбора объекта

В зависимости от функционального назначения машины и механизмы делятся на две группы

1. Устройства, создаваемые для максимального ресурса работы, совершенствование конструкции которых продолжается на всех этапах жизненного цикла (двигатели различного типа, турбоагрегаты, гидроагрегаты и др.)

2. Изделия, которые на этапе эксплуатации находятся в режиме ожидания и выполнение ими функций длится короткий интервал времени (например, часовые механизмы, являющиеся командными аппаратами и входящие в устройства выпуска парашютных систем и др.). Примером таких изделий являются наиболее сложные для оценки функционирования и диагностики дефектов приборы точной механики. Представителем их являются часовые механизмы, имеющие прецизионную точность изготовления, практически не регистрируемую вибрацию. Программные часовые механизмы, применяемые в ракетной и космической технике и др., задачей которых является выдача управляющих команд с предельно высокой степенью надёжности (до $P=0,99999$). Они проходят полный цикл испытаний, значительно удорожающих себестоимость изделия и отбирающих заметную часть ресурса (виброиспытания, ударные воздействия, линейные ускорения, вакуум, температурные воздействия и др.), так как применяемые методы диагностики не позволяют для серийных экземпляров без испытаний оценить надёжность и работоспособность.

Для исследования, контроля и диагностики в приборах проверки часов используются шумы спускового регулятора. В основе акустического метода лежат затухающие колебания и оценки показывают, что переходные процессы длятся сотни микросекунд и, следовательно, период колебания можно косвенно измерить с погрешностями порядка одной миллисекунды

Вариации периода колебания баланса находятся за пределами разрешающей способности акустических средств контроля и поэтому регистрируются только грубые дефекты.

Экспериментальные исследования часового механизма. В главе рассмотрены результаты исследований, которые проводились с применением фазохронометрической системы (ФХС). Измеряемый параметр – период колебания баланса. Применение оптико-электронных (фотоэлектрических) измерений обеспечило повышение точности измерения на три порядка. Созданная ФХС имеет абсолютную погрешность измерения не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ с. Относительная погрешность для периодов от 0,01 с до 0,4 с составила от $2,5 \cdot 10^{-5}$ % до 10^{-3} %.

Обработка экспериментальных данных (ряды интервалов времени, соответствующие периоду колебания баланса) впервые выявила:

- вариации периода колебания баланса находятся в интервале $10^{-4} \div 10^{-6}$ с и не регистрируются традиционными акустическими средствами контроля,

- вариации периода колебания баланса не подчиняются нормальному закону распределения вопреки существующим представлениям, а имеют ярко выраженный детерминированный характер и формируются под взаимодействием элементов редуктора механизма,

- одним из основных факторов, формирующих структуру хода часового механизма, является изменение крутящего момента анкерного колеса,

- индивидуальность количественных характеристик для каждого серийного экземпляра часового механизма,

- выявлены общие устойчивые во времени диагностические признаки, свойственные для часовых механизмов различной конструкции, например, периодичность изменения автокорреляционной функции (рис. 3, 4).

Выполнены экспериментальные исследования при температурных (рис. 3, 4) и механических воздействиях.

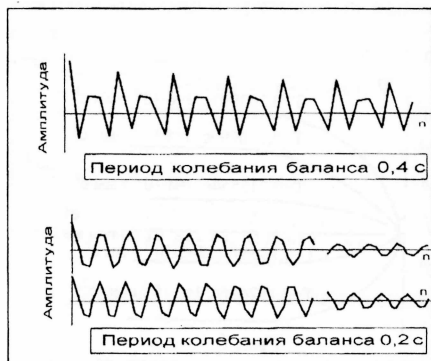


Рис. 3.

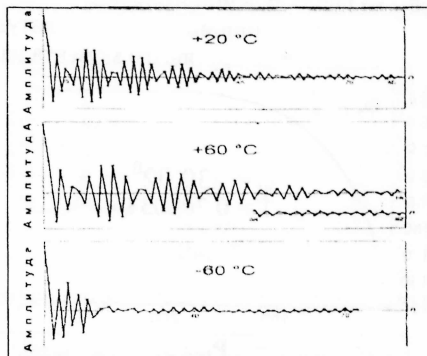


Рис. 4.

Применяемые математические модели не объяснили полученные результаты для часовых механизмов. Аналогичный результат получен при исследовании других объектов, например, турбоагрегатов, редукторов и др.

Математическая модель в фазохронометрическом представлении объекта должна обеспечивать

- информацию, соизмеримую с экспериментальными данными,
- обладать детальностью на уровне отдельных элементов механизма и учитывать размеры и допуски взаимодействующих деталей выбор оптимального варианта и анализ изготовленного механизма,
- получение результатов вычислительного эксперимента в виде рядов интервалов времени.

На этапе разработки изделия математическая модель играет особую роль, обеспечивая вычислительный эксперимент по выбору оптимального варианта, оценку функционирования механизма при изменении параметров и интерпретацию экспериментальных данных испытаний варианта конструкции и контроля качества готового изделия. Она является основой САПР изделия, позволяет уменьшить сроки и затраты на разработку на базе выполнения вычислительных экспериментов.

Для восполнения возникшего пробела в отношении часовых механизмов разработаны

- математическая модель расчета геометрических параметров конструкции для получения на этапе сборки исходных данных для моделирования динамики функционирующего механизма с учётом допусков, установленных на размеры деталей, координат и допусков на расположение осей и положений ограничительных штифтов, технологических параметров или результатов измерения деталей и параметров часового механизма.

- промышленная версия математической модели динамики свободного анкерного хода сопряженного с кинематикой и описанием 22 непрерывно сопрягаемых этапов в фазохронометрическом представлении. Разработанная модель является основой САПР изделия, позволяет уменьшить сроки и затраты на разработку на базе выполнения вычислительных экспериментов.

Результаты вычислительного эксперимента по исследованию влияния изменения параметров часового механизма на период колебания баланса представлены на рис. 5, 6 демонстрируют

- выход на стационарную амплитуду (рис. 5),
- изменение крутящего момента на анкерном колесе (рис.6).

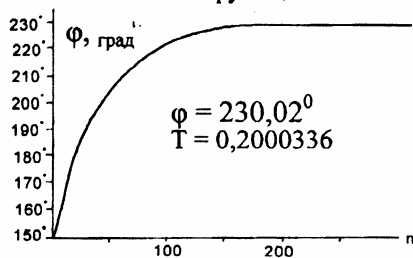


Рис. 5.

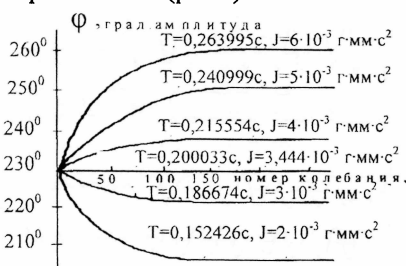


Рис. 6.

Фазохронометрический анализ модернизации турбоагрегата ТЭЦ. Конструкция и тепловая схема турбины Т-250/300-240 обеспечивает возможность ее эксплуатации, как в конденсационных, так и в теплофикационных режимах. На турбоагрегате №5 ТЭЦ-23 – филиала ОАО «МОСЭНЕРГО» во время капитального ремонта для более эффективного использования энергии пара в теплофикационном режиме работы турбины были сняты 31-я и 40-я ступени лопаток ЦНД. Отмечено отличное состояние выходных кромок рабочих лопаток 30-й и 39-й ступеней. Общий положительный вывод сделан по экспертным оценкам опытных специалистов на основе анализа полученных результатов испытаний. Для окончательного заключения необходима была оценка изменения динамики функционирующего турбоагрегата (ТА), в котором при модернизации изменились следующие физические параметры: момент инерции ротора цилиндра низкого давления при удалении двух ступеней лопаток наибольшего размера, изменение параметров балансировки, изменение параметров крутильной жёсткости валопровода.

Штатное контрольно-измерительное оборудование ТЭЦ, применяемое для параметрической диагностики функционирующего ТА, не зарегистрировало выход параметров за штатные нормативы.

Для технической оценки изменений в работе модернизированного ТА №5 бы-

ла установлена ФХС.

ФХС обеспечила абсолютную погрешность измерения интервалов времени не более $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с. Это позволило получить относительную погрешность $5 \cdot 10^{-4} \%$ в условиях эксплуатации ТА при номинальном значении периода вращения валопровода 0,02с на промышленной частоте 50Гц.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с применением пакетов прикладных программ.

Для сравнительного анализа была использована база экспериментальных данных и результаты исследования функционирования турбоагрегата №3 ТЭЦ-26 г. Москвы той же серии Т-250/300-240 без конструктивных изменений.

Анализ работы ТА №7 ТЭЦ-23 подтвердил повторяемость диагностических признаков и количественное различие характеристик, получаемых фазохронометрическим методом для однотипных ТА.

На рис. 7 представлены, впервые полученные, спектры крутильных колебаний валопровода модернизированного ТА с сопоставимой повторяемостью положения спектральной линии крутильных колебаний ротора генератора, на рис. 8 их детализация.

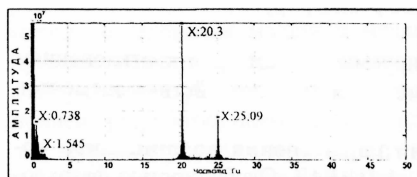


Рис. 7

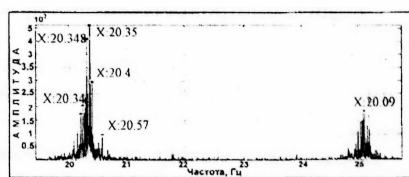


Рис. 8

Далее на рис. 9 представлен спектр модернизированного ТА и его детализация.

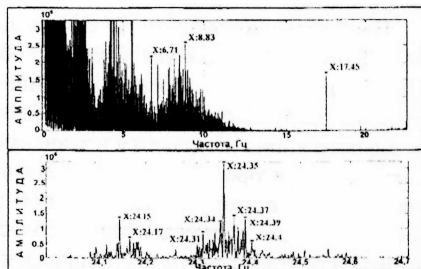
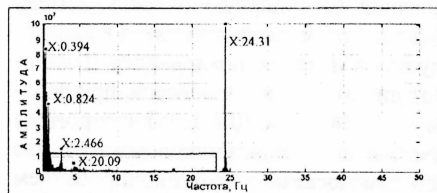


Рис. 9

Спектральный анализ показал, что удаление лопаток 31-й 40-й ступеней турбины №5 ТЭЦ-26 привело к смещению частоты крутильных колебаний валопровода в низкочастотную область. Это подтверждается также вычислительным экспериментом с применением математической модели ТА, показавшим смещение частоты крутильных колебаний валопровода турбины в область 8Гц. Известно, что для механических и электромеханических систем низкочастотные вибрации являются наиболее нежелательными, так как ведут к ускоренному разрушению конструкции. С этих позиций удаление 31-й и 40-й ступеней не может быть признано оптимальным вариантом изменения конструкции ТА, так как характеризуется повышенной скоростью де-

градации конструкционных материалов турбины в связи с цикловой усталостью. Также отрицательные явления связаны с изменением параметров балансировки.

Таким образом, штатная аппаратура ТЭЦ, построенная на традиционных методах, не зафиксировала изменения в работе турбоагрегата. Технические и экономические показатели эксплуатации признаны положительными. Зарегистрировано изменение режима функционирования турбоагрегата после изменения конструкции его валопровода. Сравнение спектров показало, что модификация не была оптимальной, так как частоты крутильных колебаний валопровода турбины переместились в низкочастотную область, нежелательную для электромеханических систем. Частота крутильных колебаний ротора генератора значительно не изменилась.

Анализ результатов фазохронометрирования работы ТА показал следующие (общие для циклических механизмов) возможности:

- выявления долгоживущих диагностических признаков, позволяющих сравнивать работу ТА через длительные промежутки времени и формировать тренды,
- выявления индивидуальных количественных характеристик объектов, необходимых для оценки текущего технического состояния каждого серийного экземпляра устройства,
- анализа быстропротекающих процессов, не регистрируемых штатной аппаратурой ТЭЦ,
- определения чувствительности контролируемых параметров к отклонениям рабочего цикла от номинальных значений и изменениям взаимодействия элементов механизма.

Предложена методика для исследования пары трения подшипников коленчатого вала дизель-генераторов 1-ПДГ4А, 1-ПДГ4Д. Особенностью фазохронометрического метода является возможность его совместного применения с различными методами исследования, обеспечивая им пространственно-временную связь с рабочим циклом механизма и его конструктивными элементами.

Проблема надёжности и системные дефекты и неисправности тепловозом ТЭМ18Д(ДМ) по основным группам оборудования и, в первую очередь, дизель 1-ПД-4Д и в том числе дефекты подшипников скольжения, выражающиеся в кратковременных разрушениях масляной плёнки, ведущих к интенсивному износу. Толщина масляного клина изменяется в зависимости от динамических процессов, при работе дизель-генератора. Для дизель-генераторов 1-ПДГ4А, 1-ПДГ4Д зафиксированы кратковременные разрушения масляной плёнки. Анализ подшипников показал, что износ происходит в определённых областях во взаимосвязи с функционированием двигателя в соответствии с периодическими процессами.

Для исследования опор скольжения школой С.Ф. Корндорфа предложен электрорезистивный метод измерения среднего значения сопротивления масляной плёнки подшипника, основанный на использовании электрической характеристики сопротивления слоя смазочного материала подшипника, возникающего между парами трения. Электропараметрический метод обеспечивает поступление информации о состоянии подшипника непосредственно из зон трения его деталей в форме электрического сигнала. Но результаты регистрации изменения масляного клина не связаны положением коленчатого вала и поршневой группы.

Для определения пространственно-временного положения линии контакта вала с отверстием и положения элементов поршневой группы был предложен фазохро-

нометрический метод измерения параметров движения вала. ФХС позволяет связать пробой масляного клина с режимами работы дизеля, генератора и нагрузки, что обеспечивает выявление влияния внешних воздействий, системы управления на функционирование подшипника и даёт возможность определить фазы рабочего цикла и положение элементов дизель-генератора в момент пробы масляного клина.

Таким образом, применение фазохронометрического метода позволяет получить принципиально новую информацию о работе машин и механизмов. Результаты анализа фазохронометрирования работы различных машин и механизмов (часовые механизмы, турбоагрегаты, ДВС, ГТД, редукторы, подшипники и др.) при достигнутом метрологическом уровне (абсолютная погрешность измерения периода $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ с) выявляют необходимость изменения конструктивно-технологической стратегии разработки и технологии изготовления и испытаний машин и механизмов. Интерпретация экспериментальных данных, сформированных фазохронометрированием, потребовала создание адекватных им математических моделей часовых механизмов, турбоагрегатов, ДВС и др. в фазохронометрическом представлении и специализированных алгоритмов обработки измерений интервалов времени для каждого объекта. Комплекс ФХС и математических моделей позволяет решать широкий круг разноплановых задач недоступный традиционным подходам. Фазохронометрический метод исследования машин и механизмов обеспечивает эффективное совместное применение различных методов исследования, обеспечивая им пространственно-временную связь с рабочим циклом механизма и его конструктивными элементами. Выполнена разработка новой производственной информационной технологии для изделий машиностроения и приборостроения на основе рекордной стабильности используемых технических средств современной отечественной хронометрии, обеспечивающих принципиально новое видение циклических машин и механизмов.

Глава 5. Информационно-метрологическое сопровождение этапа эксплуатации циклических машин и механизмов

Этап эксплуатации характеризуется различными режимами работы машин и механизмов: от режима ожидания с коротким временем функционирования до длительной, интенсивной и непрерывной работы в различных условиях.

Выбор турбоагрегата (ТА) как представительного объекта для рассмотрения жизненного цикла на этапе эксплуатации обусловлен их длительной эксплуатацией, непрерывностью их совершенствования и сложностью проблем данного этапа жизненного цикла генерирующих мощностей России.

В настоящее время «установленная мощность генерирующего оборудования по России – 2016 Гигаватт в 2008 году; при этом 59% генерирующего оборудования отработало свой ресурс полностью, более четверти генерирующего оборудования выработало свой ресурс на 80%, степень износа электросетей составляет 63%», то есть диагностика, прогноз безаварийной работы и надёжная аварийная защита приобретают принципиальное значение. Подобные проблемы стоят также в гидроэнергетике и для всех видов транспорта. В связи с этим для обновления техники требуется резерв времени, в течение которого необходимо обеспечить безаварийную и экономически обоснованную эксплуатацию машин и механизмов и обеспечить:

надёжную аварийную защиту генерирующих мощностей и вспомогательного оборудования,

прогнозирующий мониторинг безаварийной работы ТА,

диагностику текущего технического состояния,
переход от системы планово-предупредительных ремонтов ТА к системе ремонтов в соответствии с текущим техническим состоянием,
научно обоснованную оценку остаточного ресурса.

Данные основные проблемы в электроэнергетике до настоящего времени традиционными методами не решены. Прежде всего, это связано с тем, что встроенные системы диагностики, осуществляющие контроль параметров и мониторинг работоспособности ТА находятся на среднем уровне точности (погрешность 0,01 – 5%), и, как следствие, традиционные подходы к исследованию и диагностике функционирующих ТА.

В процессе многолетней эксплуатации энергетического оборудования, его контрольно-диагностического и ремонтного обеспечения определились два направления изучения проблемы динамики валопровода турбоагрегата

1. Валопровод, как ответственный конструктивный элемент турбоагрегата, функционирующий в сложнапряженном состоянии и определяющий своей прочностью и долговечностью надежность турбоагрегата в целом.

2. Валопровод как элемент энергетической системы, движение которого влияет на её устойчивость.

Исследования ТА с применением фазохронометрических систем в период с 1995 года по 2009 год работы показали, что использование фазохронометрической информации о кинематических параметрах движения валопровода позволяет проводить текущую диагностику и обеспечивает его аварийную защиту.

В главе представлены результаты экспериментальных исследований синхронных генераторов большой мощности фазохронометрическим методом.

Реализованное информационно-метрологическое сопровождение различных экземпляров функционирующих ТА и математическая обработка результатов измерений позволили получить ранее не регистрируемые аппаратурой ТЭЦ характеристики работы ТА на принципиально новом уровне информации.

ФХС обеспечили наблюдение и регистрацию отклика валопровода на вариации нагрузки внешней сети и управляющие воздействия системы управления. Вариации нагрузки носят случайный характер, и при подключении мощной нагрузки наблюдается резкое изменение периода вращения в сторону увеличения, при отключении - ускорение скорости вращения.

Анализ выявил особенности взаимодействия турбогенератора с внешними нагрузками, порождающими переходные процессы при восстановлении номинального режима. На достигнутом уровне точности обнаружилась неравномерность вращения валопровода. Различными оказываются продолжительности двух последовательных оборотов, проявляется неравномерность вращения даже в пределах одного оборота и крутильные колебания валопровода. Эта неравномерность вызывается нестабильностью напора в турбине и параметров электрической нагрузки. Выяснилось, что штатные контрольно-измерительные средства ТЭЦ не регистрируют быстротекающие процессы, что необходимо для определения зарождающихся дефектов, оценки влияния на работу ТА системы управления и внешней сети, а также его аварийной защиты.

Графики изменения кинематики вращения валопровода, отражающие взаимодействие с внешней сетью и СУ, представлены для ТА №3 ТЭЦ-26 на рис. 10 и ТА

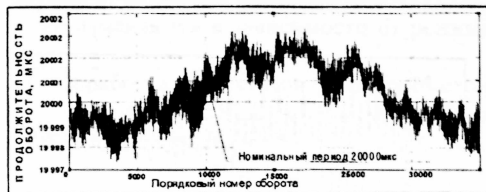


Рис. 10

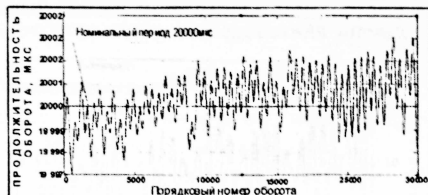


Рис. 11

Турбоагрегат испытывает воздействия со стороны энергосистемы и системы управления, приложенные к ротору генератора в виде электродинамического и со стороны турбины механического крутящих моментов, действующих на валопровод и возбуждающих его крутильные колебания, которые постоянно присутствуют в работе ТА.

Далее на рис. 12, 13 представлены результаты регистрации быстропротекающих переходных процессов, сопровождающихся вариациями периода вращения и крутильными колебаниями валопровода турбоагрегата. К процессам, которым уделяется внимание, относятся включение генератора во внешнюю сеть и его отключение. Их параметры не регистрируются штатными средствами.

Качественная повторяемость периодограмм отключения генератора от внешней сети подтверждает возможность проведения сравнительного анализа на длительных отрезках работы ТА, выявления устойчивых долговременных диагностических признаков и их индивидуальных количественных характеристик, выявление трендов, что необходимо для оценки текущего технического состояния. Важно отметить повторяемость параметров качания вращающегося ротора генератора после выключения из внешней сети (рис. 13).

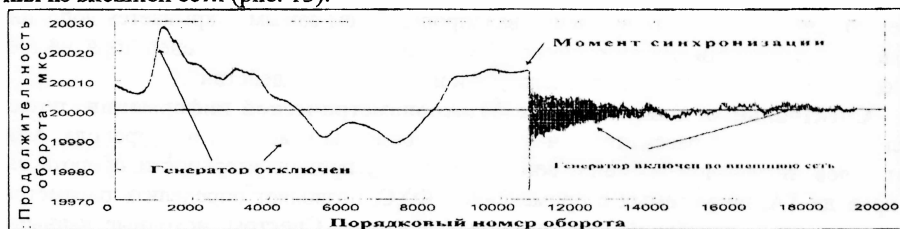


Рис. 12

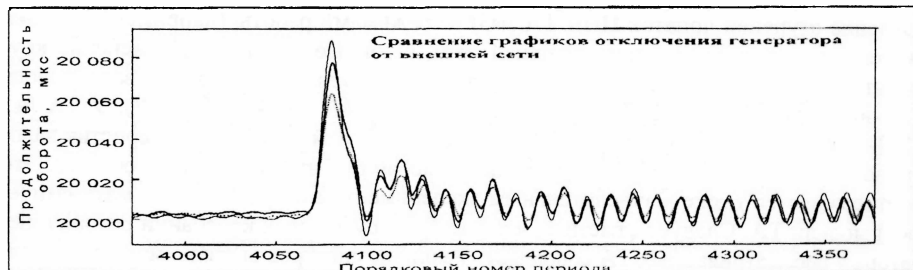


Рис. 13

Автокорреляционный анализ (рис. 14, 15) характеризуется более детальным рассмотрением процесса вращения валопровода ТА и выявляет особенности его работы.

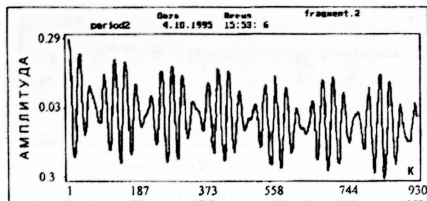


Рис. 14

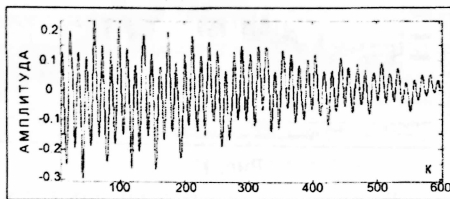


Рис. 15

Автокорреляционный анализ показал:

- качественное совпадение характера протекающего процесса и проявление количественных индивидуальных особенностей каждого ТА,
- наличие «долгоживущих» характеристик, изменение которых могут использоваться в качестве диагностических признаков.

ФХС обеспечили впервые регистрацию даже малых кратковременных всплесков крутильных колебаний валопровода турбоагрегата.

В главе также представлена методика определения параметров низкочастотных крутильных колебаний валопровода ТА фазохронометрическим методом. Измерение параметров крутильных колебаний необходимо в связи с тем, что они признаны одной из основных причин возникновения трещин в роторах и постоянно присутствуют в режиме вращения валопровода. На основе прецизионных хронограмм в промышленных условиях получается эквивалентная осциллограмме пространственно-временная развертка низкочастотных крутильных колебаний вращения вала турбогенератора, где роль несущей частоты, модулируемой низкочастотным сигналом, играет номинальная частота вращения валопровода. Тем самым открывается дополнительная возможность систематического контроля состояния турбогенератора, не требующая применения коротких замыканий и нештатных воздействий.

Спектральный анализ на базе фазохронометрической информации позволил более детально рассмотреть частотные параметры вращения валопровода. Анализ рядов интервалов времени, соответствующих продолжительности оборота валопровода ТА, получаемых с применением ФХС, позволяет определить параметры его крутильных колебаний при различных режимах. Спектры, исходные данными для которых являются временные ряды, сохраняют качественную повторяемость и количественные отличия, определяемые конструктивными изменениями (например, удаление ступеней лопаток ЦНД ТА №5) и режимами работы (например, действия системы управления, влияние внешней сети, сезонные изменения, изменение крутильной жёсткости и т.д.). Примером спектров крутильных колебаний валопровода ТА являются спектры №3 ТЭЦ-26 (рис. 16) и ТА №5 ТЭЦ-23 (рис. 17). У ТА №5 ТЭЦ-23 сняты 42 и 43 ступени ЦНД, что привело к изменению характеристик валопровода и смещению частоты крутильных колебаний в низкочастотную область. Это подтверждается также вычислительным экспериментом с применением математической модели ТА. Следует отметить, что частоты крутильных колебаний ротора генератора у рассматриваемых ТА совпадают. Различие спектров вызвано модернизацией ТА №5.

На рис. 16 и 17 детально показаны спектральные области крутильных колебаний ротора генератора для серийного ТА №3 и модернизированного №5, которые также изменяются в зависимости от режимов эксплуатации и воздействий внешней сети.

Обработка результатов фазохронометрирования выявила

- устойчивые долгоживущие, наблюдаемые с 1995 года диагностические признаки, которые являются основой для получения трендов и прогнозирования,
- количественные индивидуальные характеристики, свойственные каждому ТА и зависящие от влияния нагрузки, условий эксплуатации и системы управления,
- возможность получения алгоритмов правильного функционирования ТА и прогноза.

Исследования показали, что спектральный анализ, исходными данными для которого являются последовательно зарегистрированные интервалы времени, обеспечивает получение частотных характеристик поведения ТА, которые позволяют:

- оценивать работу ТА по изменению спектра крутильных колебаний валопровода при различных режимах работы,

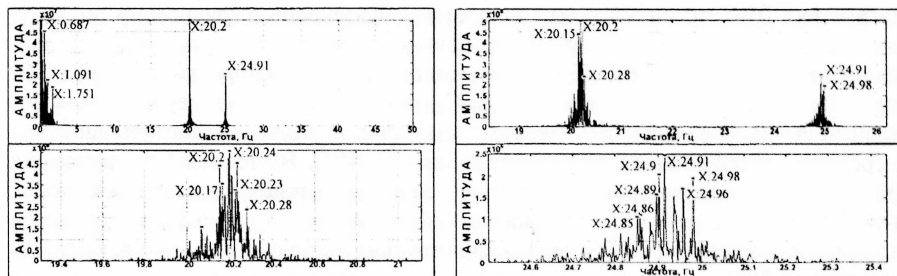


Рис.16

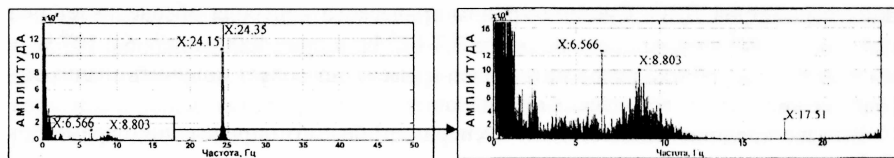


Рис.17

- проводить оценку функционирования ТА на переходных режимах,
- анализировать влияние системы управления на поведение валопровода,
- оценивать влияние конструктивных изменений на правильность процесса функционирования.

Данная информация является исходной для оценки текущего и прогнозирования технического состояния ТА. Необходимы также исследования взаимодействия ТА с внешней сетью для совершенствования системы управления ТА. Регистрация функционирования ТА за длительные промежутки времени (сутки и более) позволяет исследовать характер внешних нагрузок, взаимодействующих с ТЭЦ. Разработана математическая модель функционирующего турбоагрегата в фазохронометрическом представлении. Для описания работы турбоагрегата применена

математическая модель в приближении сосредоточенных параметров, где ступени турбины и ротор генератора представляются эквивалентными системам лопаток дисками, закрепленными на упругих, способных к кручению и изгибу стержнях, динамически эквивалентных ротору генератора и отрезкам валопровода.

Если воспользоваться математической моделью синхронного генератора, достаточно, экспериментально определив на различных частотах амплитуды и фазы угла качаний ротора и тока в цепи возбуждения, рассчитать и все частотные характеристики эквивалентных контуров ротора и статора, что защищено патентом. Таким образом, определение параметров закона малых качаний вращающегося ротора обеспечивает практически невозмущающий систематический измерительно-вычислительный мониторинг генератора.

В данной главе также рассмотрено состояние вопроса диагностики двигателя внутреннего сгорания на базе контроля кинематических параметров. С середины 70^х годов по 90-е годы выполнен большой объем научно-исследовательских и экспериментальных работ по обоснованию применения неравномерности (изменение угловой скорости) вращения коленчатого вала (КВ) для исследования, контроля и диагностики ДВС методами предшествующими фазохронометрическому подходу. Выполнено теоретическое обоснование оценки рабочего процесса и неравномерности работы цилиндров ДВС по неравномерности угловой скорости вращения КВ. Предложены параметры оценки работы ДВС, связанные с неравномерностью частоты вращения КВ. В рамках технических возможностей были разработаны аппаратные средства, обеспечившие исследования систем ДВС. Выполнены исследования работы по исследованию группы движения, системы питания, системы зажигания, системы газораспределения для обоснования эффективности применения параметров неравномерности вращения КВ в оценке конструкции, доводки, испытания, контроля и диагностики ДВС.

Полученная ранее точность не более 0.2% недостаточна для детального исследования параметров ДВС. Система хронометрического контроля обеспечивает при частоте 2000 мин⁻¹ погрешность не более $3,3 \cdot 10^{-4} \%$, а при 4000 мин⁻¹ $6,6 \cdot 10^{-4} \%$, а математическая обработка рядов интервалов времени позволяет получить значительно большее число диагностических признаков.

В главе представлена методика экспериментального определения параметров ДВС фазохронометрическим методом.

Основные выводы и результаты

1. Эталонная база хронометрии (измерение времени и частоты), имеющая наивысшую стабильность, позволяет перенести её рекордный метрологический уровень в практику машиностроения (включая этапы создания и эксплуатации), обеспечивая в классе фазохронометрических измерений, благодаря их высокой разрешающей способности, возможности нового видения машин и механизмов.

2. Применение фазового метода в сочетании с прецизионной хронометрией для исследования рабочего цикла, который является исходным первичным процессом машин и механизмов, обеспечило получение принципиально новой информации о функционировании технических объектов на всех этапах жизненного цикла и переход на новый уровень их исследования, диагностики и аварийной защиты. Для

рабочих циклов машин и механизмов наиболее информативной динамической переменной является полярный угол радиус-вектора точки, изображающей на фазовой плоскости состояние циклической системы. Наблюдаемыми величинами здесь являются регистрируемые интервалы времени при фазохронометрических измерениях и соответствующие характерным интервалам фаз рабочего цикла.

3. Разработанные на общих принципах фазохронометрического подхода математические модели реализуют взаимосвязь экспериментальных данных с рабочим циклом и конструкцией машин и механизмов, что обеспечивает внедрение математических моделей непосредственно в процесс исследования, разработки, изготовления, испытания, эксплуатации и ремонта машин и механизмов.

4. С использованием процедуры многократных измерений и методов их планирования при оценке качества измерительной процедуры по уровню систематической погрешности и дисперсии разработано метрологическое обеспечение встроенных фазохронометрических систем (например, для турбоагрегатов ТЭЦ и гидроагрегатов), измерительные каналы которых встраиваются в объект и работают в условиях его эксплуатации. Предложенный подход обеспечивает непрерывный количественный контроль метрологических характеристик измерительного канала в процессе эксплуатации изделия без необходимости перерасчёта поверочного интервала при вариациях условий эксплуатации и влияющих величин. Тем самым оценка годности измерительного канала выполняется по текущим метрологическим характеристикам, что повышает надёжность фазохронометрических систем и снижает затраты на их реализацию.

5. На основе фазохронометрического подхода разработаны единые принципы проектирования фазохронометрических систем для всех этапов жизненного цикла изделия, что значительно сокращает номенклатуру технических средств контроля и диагностики, а также финансовые и материальные затраты.

6. На базе единого формата контролируемых метрологических характеристик (интервалы времени), единых подходов к математической обработке экспериментальных данных и математическому моделированию решена проблема информационного обмена между этапами жизненного цикла, тем самым обеспечивается накопление и передача информации с этапа эксплуатации в КБ и на заводы (этапы разработки и изготовления изделий) для совершенствования конструкции и технологических процессов.

7. Разработанная информационная технология на базе фазохронометрических измерений параметров рабочего цикла, обеспечивает применяемым в настоящее время различным методам исследования машин и механизмов пространственно-временную взаимосвязь с фазами рабочего цикла, конструкцией циклических машин и механизмов и с параметрами движения их элементов.

8. На единой научной базе фазохронометрического подхода разработаны методы и средства информационно-метрологического сопровождения и аварийной защиты синхронных генераторов большой мощности ТЭЦ, гидроагрегатов ГЭС, часовых механизмов и двигателей внутреннего сгорания.

9. Применение фазохронометрических систем и математического моделирования для исследования работы турбоагрегатов ТЭЦ обеспечило получение принципиально новой информации и впервые

- достигнута относительная погрешность определения периода вращения валов

провода ТА ТЭЦ $5 \cdot 10^{-4}$ %, позволившая реализовать регистрацию, возбуждаемых изменениями внешней нагрузки и управляющих воздействий, его крутильных колебаний которые считаются одной из основных причин накопления усталости в металле валопровода и аварийного трещинообразования в нём (технология измерения параметров крутильных колебаний валопровода турбоагрегата отсутствует в энергетике),

- зарегистрированы вариации продолжительности оборота валопровода турбоагрегата и различные быстропротекающие процессы, не регистрируемые штатной аппаратурой, но влияющие на работоспособность турбоагрегата,

- в мировой практике обработкой результатов фазохронометрических измерений получен спектр крутильных колебаний валопровода турбоагрегата, в том числе для низкочастотной области, содержащий диагностическую информацию,

- в мировой практике обоснован теоретически и экспериментально метод систематического контроля частотных характеристик синхронных генераторов большой мощности в рабочем режиме (имеется патент),

- обоснован теоретически и экспериментально измерительно-вычислительный прогнозирующий мониторинг технического состояния турбоагрегатов ТЭЦ не имеющих аналогов,

- подтверждено, что фазохронометрическая система в сотни раз более оперативна, чем штатные средства ТЭЦ, и обеспечивает новый уровень аварийной защиты турбоагрегатов.

По результатам выполненных исследований опубликованы, 25 статей в научно-технических журналах, в журналах по списку ВАК – 13 статей, 50 тезисов докладов на научно-технических конференциях. Получены патент и два авторских свидетельства на изобретение.

Основные положения отражены в следующих публикациях:

1. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Прецизионная стробоскопия для исследования машин и механизмов // Известия вузов. Машиностроение. 1984. №6. С. 33-36.
2. Киселёв М.И., Пронякин В.И., Уроженко В.В. Совершенствование метода контроля механических часов // Измерительная техника. 1987. № 6. С. 37.
3. Киселёв М.И., Ней Н.А., Пронякин В.И. Задача о точке встречи в математической модели часового механизма // Известия вузов. Приборостроение. 1988. Т. XXXI. № 3. С. 46-50.
4. Оптоэлектронные средства автоматической диагностики приборов точной механики / В.И. Пронякин [и др.] // Приборы и системы управления. 1990. №4. С. 21-23.
5. Измерение периода вращения валопровода турбоагрегата фотоэлектрическим методом / В.И. Пронякин [и др.] // Измерительная техника. 1996. № 12. С. 28-29.
6. Частотно-хронометрический контроль циклических машин и механизмов / В.И. Пронякин [и др.] // Приборы и системы управления. 1998. № 3. С. 33-34.
7. Киселёв М.И., Новик Н.В. Пронякин В.И. Регистрация параметров крутильных колебаний валопровода турбогенератора // Измерительная техника. 2000. № 12. С. 34-36.
8. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазовый метод исследования циклических

машин и механизмов на основе хронометрического подхода // Измерительная техника. 2001. №9. С. 15-18.

9. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Измерительно-вычислительное обеспечение создания часовых механизмов // Измерительная техника. 2003. №5. С. 22-28.

10. Киселёв М.И., Пронякин В.И., Темнов В.С. Расчёт хронометрического отклика турбоагрегата на синусоидальное тестовое воздействие // Измерительная техника. 2005. №10. С. 48-50.

11. Прецизионное исследование работы турбоагрегата оптико-электронными средствами. / В.И. Пронякин [и др.] // Теплоэнергетика. 2006. №11. С.10-13.

12. Киселёв М.И., Пронякин В.И., Чивилёв Я.В. Регистрация и анализ параметров останова // Измерительная техника. 2006. №8. С. 24-27.

13. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов // Измерительная техника. 2008. №10. С. 9-13.

14. Пронякин В.И. Исследование колебаний осциллятора механических часов фотоэлектрическим методом // Расчёт, конструирование и управление качеством приборов времени: Труды НИИЧаспрома. М., 1982. С. 70-74.

15. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Экспериментальное исследование вариаций хода часов при механических воздействиях. М., 1983. 15с. Деп. в ВИНТИ 30.06.83. Москва. № 3542-83.

16. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Прецизионная автоматическая бесконтактная диагностика и разработка САПР устройств точной механики // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана: Исследования динамики и прочности машин. М.: 1986. № 467. С. 59-68.

17. Киселёв М.И., Новик Н.В., Пронякин В.И. О возможности хронометрического контроля двигателя внутреннего сгорания // Испытания материалов и конструкций: сборник научных трудов под ред. С.И. Смирнова и В.И. Ерофеева. Н. Новгород: Издательство общества «Интелсервис», 1996. С. 255-261.

18. Определение хронометрическим методом параметров низкочастотных крутильных колебаний валопровода турбогенератора / Н.А. Зройчиков [и др.] // Испытания материалов и конструкций: сборник научных трудов / Под ред. С.И. Смирнова и В.И. Ерофеева Н. Новгород: Издательство общества «Интелсервис», 2000. Вып. 2. С. 311-317.

19. Измерительный контроль синхронного генератора большой мощности в рабочем режиме на основе хронометрического подхода. / Н.А. Зройчиков [и др.] // Новое в Российской электроэнергетике. 2000. № 3. С. 17-21.

20. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Прецизионный фазовый контроль функционирующих циклических машин и механизмов хронометрическим методом и его приложения // Фундаментальные проблемы и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем («Фридлиендерские чтения»): Труды пятой сессии международной научной школы. СПб: ИПМ, 2002. С. 55-60.

21. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Проблема точности при метрологическом обеспечении производства и эксплуатации машин и механизмов // Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надёжность, перспективные технологии; Под ред. В.П. Булатова. – Санкт-Петербург: Наука, 2005. С. 7-24.

22. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Фазохронометрический контроль валопроводов турбоагрегатов // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и ди-

агностики оборудования электрических станций: Сборник докладов Всероссийского научно-технического семинара; Под общей ред. А.В. Салимона. М.: ОАО «ВТИ», 2005. С. 84-89.

23. Киселёв М.И., Пронякин В.И. Математическое обеспечение селективной сборки часового механизма /Современные технологии сборки. 2005. №7. С. 10-15.

24. Объединённые научно-производственные коллективы в решении перспективных и важнейших текущих научно-технических проблем. Совершенствование методов и средств диагностики / В.И. Пронякин [и др.] // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: Сборник докладов Международного научно-технического совещания. М.: ОАО «ВТИ», 2007. С. 124-128.

25. Пронякин В.И. [и др.] Время не ждёт // Гидротехническое строительство. 2009. №9. С. 27-33.

Патенты и авторские свидетельства

26. Устройство для измерения динамических деформаций валов в стационарном режиме вращения: а.с. 1060944 СССР / О.А. Ивлёв, М.И. Киселёв, В.И. Пронякин заявл. 21.12. 81; опубл. 15.12.83. Бюлл. №46.

27. Устройство для регистрации угловых и линейных перемещений вращающегося объекта: а.с. 1803728 СССР / М.И. Киселёв, В.И. Пронякин, В.О. Гладышев, С.Н. Горчаковский заявл. 19.03.91; опубл. 23.03.93. Бюлл. №3.

28. Способ экспериментального определения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик качаний ротора синхронного генератора в рабочем режиме: патент 2233455 РФ / М.И. Киселёв, В.И. Пронякин заявл. 15.03.02; опубл.10.09.03. Бюлл. №25.