

На правах рукописи
УДК 621.313.322-81:621.317.757

Темнов Владимир Сергеевич

**ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ
ФАЗО-ХРОНОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое
обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2006

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного знамени государственном техниче-
ском университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Киселев Михаил Иванович;
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Телешевский Владимир Ильич;
кандидат технических наук
Телешевский Николай Борисович.

Ведущая организация –
институт метрологическ

Темнов В.С. У1765695
Измерительно-
вычислительное
сопровождение эксплуатации
циклических машин и меха...

владельческий

2006 г.

Защита диссерт
в 14 час. 30 м

Зета Д 212.141.18 в

Н.Э. Баумана

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

им. Н.Э. Бау-

й печатью ор-

тов Ю.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1765695

таж 100 экз.
Э. Баумана

Актуальность темы. Система планово-предупредительных ремонтов и регламентных профилактических работ в основном обеспечивала эффективность эксплуатации технических объектов народного хозяйства России на протяжении почти всего прошлого века. Однако с приближением его окончания эта система все более переставала себя оправдывать и закономерно возникла постановка вопроса об оценке технического состояния функционирующих объектов с помощью встроенных систем. Начало нового века совпало для России со вступлением в полосу технических аварий и техногенных катастроф. Особенно тяжёлое положение сложилось на транспорте (включая вертолётный и трубопроводный) и в энергетике (об этом свидетельствует хроника аварийных ситуаций), что объясняется физическим износом образцов техники при сокращении объемов их возобновления.

По мнению специалистов, в ближайшие годы будет исчерпан ресурс значительной части действующих турбогенераторов ТЭЦ. Проблема прогнозирующего мониторинга технического состояния машин и механизмов встала при этом с ещё большей остротой.

Для измерительно-диагностической аппаратуры, применяемой в машиностроении и основанной преимущественно на амплитудных методах, характерны уровни точности порядка $(0.01 \dots 1) \%$.

При сложившемся положении метрологическое обеспечение эксплуатации претерпевающей износ и деградацию конструкционных материалов техники требует новых научных подходов и адекватных технических решений. Современная хронометрия, обозначившая резкий контраст уровней точности, существующий, например, между технической астрометрией или навигацией и машиностроением, закономерно должна явиться основой таких подходов. Исследования на реальных функционирующих технических объектах показали, что диапазон вариаций результатов измерений характерных для их работы временных интервалов может составлять $(5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-2})\%$ от номинального значения. Именно в этом узком интервале $\sim (1 \dots 10) \text{ мкс}$ необходимо в условиях эксплуатации объекта (турбоагрегата, двигателя и т.п.) обеспечить высокую разрешающую способность и чувствительность способа фазо-хронометрической регистрации изменений технического состояния объекта с целью его оценки и прогноза. В представленной работе обеспечена абсолютная погрешность измерения характерных интервалов времени 10^{-7} с , что составило $5 \cdot 10^{-4} \%$ от номинального значения периода вращения валопровода турбоагрегата.

Отметим, что время, которое наряду с пространством относится к категориям, обозначающим основные формы существования материи, может служить и в качестве количественной меры изменения состояния систем и объектов.

Таким образом, актуальные технические решения проблем обеспечения эффективной аварийной защиты машин и механизмов, создания систем прогнозирующего мониторинга их технического состояния могут быть реализованы благодаря достижению более высокой точности фазо-хронометрического определения параметров функционирующих объектов, подавляющее большинство которых являются циклическими.

Цель работы - разработка методов и технических средств, позволяющих с высокой точностью определять параметры текущего технического состояния циклических машин и механизмов, осуществлять мониторинг технического состояния в процессе их функционирования, с использованием построенных для них математических моделей и экспериментально получаемых временных рядов и частотных характеристик.

Объект исследований - циклические устройства электромеханики.

Методы исследований - расчетно-теоретические исследования поведения электромеханических циклических устройств (турбоагрегатов, синхронных двигателей) с помощью созданных для их описания математических моделей, экспериментальные фазо-хронометрические исследования этих объектов.

Научная новизна. В работе для осуществления мониторинга циклических машин и механизмов, в частности турбогенераторов, в реальном времени в отличие от традиционных амплитудных (например, виброакустического) методов, используется фазовый (фазо-хронометрический) метод. В диссертации показана возможность:

- измерения параметров крутильных колебаний ротора генератора и секций валопровода турбины;
- получения фазо-хронометрического отклика параметров рабочего режима функционирующего турбоагрегата на пробное воздействие и вариации конструктивных параметров, при мощности генератора пробных воздействий порядка $10^{-6}\%$ от номинальной мощности турбоагрегата.

В диссертации определены параметры генератора тестовых воздействий и дано расчетно-теоретическое обоснование возможности применения приборов аналогового типа в импульсных режимах для обеспечения дискретных отсчетов при квантовании фазы рабочего цикла.

Практическая ценность. Применение результатов диссертации позволяет осуществлять аварийную защиту и контроль текущего технического состояния турбоагрегата в реальном времени, получая с высокой точностью исходную хронометрическую информацию и в результате её обработки - частотные характеристики, определять параметры крутильных колебаний ротора турбогенератора и секций валопровода турбины в рабочих режимах. Благодаря рекордной стабильности и точности технических средств измерения интервалов времени удастся обнаруживать отклонения параметров контролируемого объекта от номинальных значений, отражающие развитие дефектов на ранней стадии.

Результаты диссертации служат основой при разработке и создании подсистемы измерительно-диагностического комплекса турбоагрегата, ответственной за мониторинг крутильных колебаний его валопровода.

Реализация результатов работы. Два измерительных модуля системы фазо-хронометрического контроля установлены на турбоагрегате №5 ТЭЦ №23 г. Москва.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на 3-й Международной конференции “Диагностика трубопроводов” (г. Москва, май 2001), Второй научно-технической конференции “Проблемы машиноведения” (г. Нижний Новгород, октябрь 2001), 8-й Всероссийской научно-технической конференции “Состояние и проблемы измерений” (г. Москва, ноябрь 2002), 7-м Всероссийском Совещании-семинаре “Инженерно-физические проблемы новой техники” с участием представителей стран СНГ (г. Москва, май 2003), Пятой международной научно-технической конференции “Чкаловские чтения” (г. Егорьевск, февраль 2004), 9-й Всероссийской научно-технической конференции “Состояние и проблемы измерений” (г. Москва, ноябрь 2004), Международном симпозиуме, посвященном 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, май 2005), Седьмой сессии международной научной школы “Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов” (г. Санкт-Петербург, октябрь 2005г.).

Положения, выносимые на защиту: схема построения системы фазо-хронометрических измерений и метрологический анализ составляющих её погрешности; экспериментальные данные, полученные с помощью системы установленной на действующий объект контроля – турбоагрегат ТЭЦ-23; результаты вычислительного эксперимента и лабораторных испытаний измерительного модуля системы фазо-хронометрического контроля; математические модели, тексты программ с результатами расчетов, полученные в ходе работы над диссертацией; расчет фазо-хронометрического отклика турбоагрегата на пробное гармоническое воздействие и оценка мощности генератора пробных воздействий.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в журнале “Измерительная техника”.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и заключения по работе, списка литературы из 97 наименований, шести приложений. Диссертация изложена на 167 страницах, содержит 51 рисунок, 2 таблицы, 19 графиков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель, научная новизна и практическая ценность работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературных источников и поставлена задача исследования. Рассмотрены существующие методы диагностики циклических машин и механизмов и показаны преимущества фазо-хронометрического метода при измерительно-диагностическом сопровождении турбоагрегатов. Рассмотрена проблема выявляемости хронометрическим методом поверхностных дефектов роторов.

Существующие методы измерительного сопровождения циклических машин и механизмов можно разделить на амплитудные и фазовые методы, в которых информационными параметрами соответственно являются измеряемые амплитуда и фаза. Основным амплитудным методом, имеющим промышленное применение, является виброакустический. Точность амплитудных аналоговых методов при измерении значений токов, напряжения, давления, температуры и других физических величин ограничивается шумами и динамическими эффектами, при этом погрешность составляет более 0,01% в зависимости от уровня шумов измеряемого объекта, используемых датчиков вибрации, фильтров и других компонентов системы измерительного контроля. При метрологическом сопровождении циклических машин и механизмов таких, например, как турбоагрегаты и, в частности, их роторы, необходимо использовать фазо-хронометрический метод, обеспечивающий более высокую точность.

Исследованы варианты использования фотоэлектрических и электрических датчиков в составе системы фазо-хронометрического сопровождения циклических машин и механизмов. Представлены существующие схемы средств определения дат моментов времени и средств измерения длительности интервалов времени. Приведены варианты использования времени в качестве диагностического параметра и показано его преимущество в точности перед амплитудными диагностическими параметрами.

Принцип работы фазо-хронометрической системы показан на рис. 1.

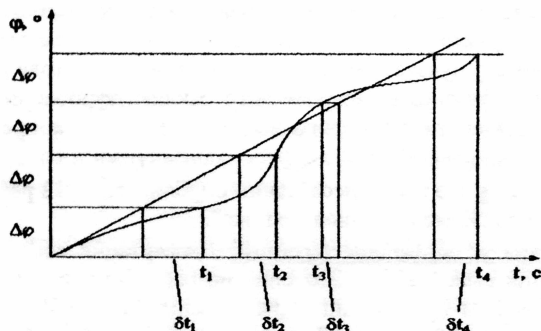


Рис. 1. Принцип работы фазо-хронометрической системы

Как видно из рисунка, в данном методе измеряются интервалы времени, соответствующие повороту (смещению) ходовой части машины, совершающей цикл, например ротора (поршня), на определённый угол (фазу рабочего цикла). Для регистрации данного угла поворота могут быть использованы имеющиеся на поверхности ротора, или специально нанесенные на нее через равные угловые интервалы $\Delta\varphi$, контрастные элементы - рельефные метки, метки из магнитного материала, оптические и другие вспомогательные элементы, жестко закрепленные на ходовой части контролируемой циклической машины.

Возможно использование измерительного диска с зубцами или прорезями, которые при вращении ходовой части циклической машины проходят мимо жестко закреплённого оптикоэлектронного или электрического (например, индукционного или холловского) преобразователя.

Основным преимуществом фазовых методов является возможность использования в качестве источника информации характерных интервалов времени и их вариаций, которые могут быть измерены с погрешностью, составляющей порядка $1 \cdot 10^{-7}$ с и менее. Снижение влияния случайных шумов достигается использованием метода синхронного накопления данных по срабатыванию от выявляемых дефектов с их последующим усреднением.

Для достижения поставленной в диссертации цели необходимо решение следующих задач:

- построение принципиальной схемы измерительно-вычислительной системы контроля циклических машин и механизмов на основе фазо-хронометрического метода;
- анализ особенностей измерительного сопровождения синхронных электрических машин фазо-хронометрической системой и построение математической модели;
- анализ особенностей контроля турбоагрегата и построение математической модели функционирования турбоагрегата, учитывающей колебания валопровода;
- построение математической модели турбоагрегата, связывающей его электрическую и механическую части и позволяющей производить расчет углов качания ротора турбогенератора и валопровода турбины в номинальном режиме и в режиме пробных воздействий;
- моделирование пробного электрического воздействия на обмотку возбуждения турбоагрегата и получение фазо-хронометрического отклика со стороны турбинной части;
- разработка и создание измерительного модуля системы фазо-хронометрического контроля, его установка на турбоагрегате и получение экспериментальных данных;
- анализ погрешностей и оценка точности экспериментальной фазо-хронометрической системы;
- применение результатов фазо-хронометрического контроля для решения задач дефектоскопии механических объектов электрическими методами с помощью индукционного, автогенераторного и холловского датчиков.

Вторая глава посвящена построению принципиальной схемы измерительно-вычислительной фазо-хронометрической системы (ИВФХС) сопровождения циклических машин и механизмов.

Предложено использование для изучения технического состояния турбоагрегата генератора пробных воздействий и проанализированы методы метрологической оценки амплитуды, фазы и моментов времени регистрации сигналов датчика от синхрометок. Рассмотрена проблема снижения влияния шумов за счет усреднения сигнала, как в процессе измерения, так и в процессе обработки хронометрических данных. Показана возможность использования электрических преобразователей, входящих в состав фазо-хронометрической системы, для дефектоскопии. Подобным образом может осуществляться диагностика в реальном времени роторов турбогенераторов, валопроводов турбин, колесных пар и других циклических машин, механизмов, узлов (рис.2).

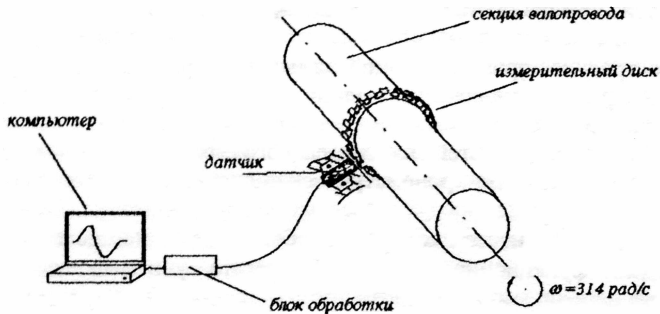


Рис. 2. Схема ИВФХС контроля валопровода турбины

Даны оценочные характеристики параметров генератора пробных воздействий для системы фазо-хронометрического контроля турбоагрегата.

Третья глава посвящена разработке математических моделей вращения ротора синхронного двигателя и математической модели преобразователя Холла (ИХ), которые являются соответственно объектом и средством измерений. Рассмотрены электромеханические процессы в циклической системе, состоящей из синхронного электродвигателя, работающего на переменную нагрузку, которой в частности, может быть насос водяного охлаждения турбогенератора. При этом учтены флуктуации электрических параметров двигателя и механического момента сопротивления вращению привода насоса. Параметры синхронного двигателя представлены в виде $\xi = \xi_0 + \xi_1$, где ξ_0 - номинальное значение параметра ξ , $\xi_1 = \xi_1(t)$ - флуктуирующая во времени составляющая параметра ξ , причем $\xi_1 \ll \xi_0$. Построенная на основе уравнений Парка-Горева, система дифференциальных уравнений синхронного двигателя с учетом флуктуаций параметров представляется в конечных разностях для решения на ЭВМ. Получены графики вариаций периода вращения ротора для различных вариаций параметров рабочего режима или параметров синхронного двигателя.

Математическое моделирование работы преобразователей Холла (ИХ) проводилось с целью наиболее полного учета процессов в измерительной цепи. Учтены паразитные выходные напряжения ИХ, диаграмма направленности.

Четвертая глава посвящена проведению расчетно-теоретических исследований системы измерительного контроля турбоагрегата с применением индукционного преобразователя и специально разработанных математических моделей. Разработана конструкция и проведен расчет параметров индукционного преобразователя для фазо-хронометрической системы. Записана полная система уравнений вращения валопровода турбоагрегата с учётом крутильных и изгибных колебаний. Для турбогенератора типа ТВВ-320-2УЗ, работающего от паровой турбины Т-250, модель содержит пять связанных дисков, первый соответствует генератору, остальные четыре – ступеням турбины. Исходная система состоит из 13 дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 + k_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + q_1(\varphi_1 - \varphi_2) + (M_{s0} + M_p) \ddot{\varphi}_1 = M_1(t) \\ J_i \ddot{\varphi}_i + k_{i-1}(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i-1}) + q_i(\varphi_i - \varphi_{i-1}) + k_i(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_{i+1}) + q_i(\varphi_i - \varphi_{i+1}) = M_i(t) \\ m_i \ddot{x}_i + \mu_{1i} \dot{x}_i + q_{1i} x_i + \mu_i(\dot{x}_i + \dot{\varphi}_i y_i) = q_{1i} e_i \cos \varphi \\ m_i \ddot{y}_i + \mu_{2i} \dot{y}_i + q_{2i} y_i + \mu_i(\dot{y}_i - \dot{\varphi}_i x_i) = q_{2i} e_i \sin \varphi - m_i g \end{cases} \quad (1)$$

$i=2, 3, 4, 5; \varphi_6, \dot{\varphi}_6=0$

Обозначения: $J_1...J_5$ - моменты инерции генератора и дисков; $\varphi_1... \varphi_5$ - углы поворота ротора генератора и дисков; $\ddot{\varphi}_1$ - осциллирующая компонента φ_1 ; $k_1...k_4$ - приведенные вязкости секций валопровода; $q_1...q_4$ - их жесткости; $m_2...m_5$ - массы дисков; $\mu_{12}... \mu_{15}$ - коэффициенты внешнего вязкого трения; $\mu_2... \mu_5$ - коэффициенты внутреннего вязкого трения; $q_{12}...q_{15}$ - изгибные жесткости; $e_2...e_5$ - эксцентриситеты дисков; $M_1...M_5$ - внешние моменты; M_{s0} - коэффициент синхронизирующего момента статического режима генератора; M_p - коэффициент вращающего момента от переходных токов в роторных контурах генератора; $x_2...x_5, y_2...y_5$ - координаты центров масс дисков.

Индексы: 1 – генератор, 2...5 – ступени турбины.

Система (1) для одночастотного режима колебаний преобразуется путем усреднения по номинальному периоду вращения к системе “укороченных” уравнений для медленно меняющихся переменных (амплитуд и фаз колебаний). При этом полагается, что значения амплитуд колебаний $a_n \ll 1, n=1..5$.

После преобразований система содержит 26 дифференциальных уравнений относительно амплитуд и фаз колебаний и пригодна для численного решения на ЭВМ.

Для приближённого аналитического описания генератора были использованы уравнения Парка-Горева для явнополюсной синхронной машины с одной обмоткой возбуждения на роторе в осях q, d , жестко связанных с ротором:

$$\left\{ \begin{array}{l} r I_d + L_d \frac{d}{dt} I_d - \omega L_q I_q - k_H \frac{d}{dt} i_B = -U \sin \theta, \\ \omega L_d I_d + r I_q + L_q \frac{d}{dt} I_q - k_H \omega i_B = -U \cos \theta, \\ r_B i_B + L_B \frac{d}{dt} i_B = U_B + k_H \frac{d I_d}{dt}, \\ J \frac{d\omega}{dt} + k_H i_B I_q - (L_d - L_q) I_d I_q = M_T, \\ \omega = \omega_0 + \frac{d\Delta\theta}{dt}, \\ x_d = \omega_0 L_d, \quad x_q = \omega_0 L_q, \quad x_B = \omega_0 L_B \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь U - выходное напряжение; I_d - ток статора по оси d ; I_q - ток статора по оси q ; r - активное сопротивление статора; L_d - индуктивность цепи статора по оси d ; L_q - индуктивность цепи статора по оси q ; L_B - индуктивность обмотки возбуждения; U_B - напряжение обмотки возбуждения; i_B - ток обмотки возбуждения; ω - частота вращения ротора; r_B - активное сопротивление обмотки возбуждения; ω_0 - частота выходного напряжения; θ - внутренний угол; k_H - взаимная индуктивность обмоток ротора и статора; J - момент инерции ротора генератора; M_T - вращающий момент турбины.

Система генератор-турбина может быть подвергнута экспериментальному исследованию с помощью возмущающих стационарный режим малых пробных гармонических воздействий. С этой целью на клеммы возбудителя генератора необходимо подать сканирующее напряжение $\Delta U_B = \Delta U_{B0} \cdot \cos \Omega t$ ($\Delta U_{B0} \ll U_B$). После линеаризации системы (2) и исключения малых возмущений ΔI_d , ΔI_q , Δi_B параметров рабочего режима генератора, служащих откликом на малое пробное воздействие, получается соотношение:

$$\begin{aligned} & \left(-\Omega^2 J \Delta_0 + \left(\frac{x_H I_{B0}}{\omega_0} - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{d0} \right) \left[i \frac{\Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} + U \cos \theta_0 \right] \left(x_d z_B - i \frac{\Omega}{\omega_0} x_H^2 \right) + \dots \right. \\ & \dots + \left[i \frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right] \cdot \left(z_d z_B - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} x_H x_B \right) + \dots \\ & \dots + \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{q0} z_B \left\{ x_q \left(\frac{i \Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} + U \cos \theta_0 \right) - \left[i \frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right] x_q \right\} - \dots \\ & \dots - i \frac{\Omega}{\omega_0} x_H \frac{x_H I_{q0}}{\omega_0} \left\{ \left[i \frac{\Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} + U \cos \theta_0 \right] z_q - \left[i \frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right] x_q \right\} \left. \right\} \frac{\Delta \theta_{10}}{\Delta_0} = \\ & = M_T (\Delta \theta_{10}, \Delta \theta_2) - \left[\left(\frac{x_H I_{B0}}{\omega_0} - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{d0} \right) \left(z_d x_H - i \frac{\Omega}{\omega_0} x_B x_d \right) + \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{q0} \cdot \left(i \frac{\Omega}{\omega_0} x_B + x_H x_q \right) - \dots \right. \\ & \left. \dots - \frac{x_H}{\omega_0} I_{q0} (z_d z_q + x_d x_q) \right] \frac{\Delta U_{B0}}{\Delta_0}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Ω - частота сканирования обмотки возбуждения турбогенератора; z , x - полные и реактивные сопротивления обмоток; J - момент инерции ротора генератора; i - мнимая единица; $\Delta\theta_0$ - угол качания ротора генератора; $\Delta\theta_2$ - вариация угла поворота второй ступени (секции валопровода ЦНД турбины);

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} z_d & -x_q & -i\frac{\Omega}{\omega_0}x_H \\ x_d & z_q & -x_H \\ -i\frac{\Omega}{\omega_0}x_H & 0 & z_B \end{vmatrix} = z_d \cdot z_q \cdot z_B + x_q \left(x_d z_B - i\frac{\Omega}{\omega_0}x_H^2 \right) + \frac{\Omega^2}{\omega_0^2}x_H^2 z_q;$$

M_T - крутящий момент на роторе генератора.

Ограничиваясь только крутильными колебаниями дисков, удастся получить сопряжение уравнений для турбины и генератора приравнованием крутящих моментов на роторе генератора и механически связанной с ним секции валопровода цилиндра низкого давления. В результате получается уравнение для отклика наблюдаемой величины угла качания ротора генератора, механически связанного со всеми ступенями турбины, на пробное гармоническое воздействие:

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[-\Omega^2 J_1 + (i\Omega k_1 + q_1) \left[1 - (i\Omega k_1 + q_1) \frac{a_{34}a_{15}a_{23} - a_{33}(a_{14}a_{25} - a_{24}a_{15})}{a_{42}[a_{34}a_{15}a_{23} - a_{33}(a_{14}a_{25} - a_{24}a_{15})] - a_{32}a_{43}(a_{14}a_{25} - a_{24}a_{15})} \right] \right] \Delta_0 + \right. \\ & + \left(\frac{x_H i_{B0}}{\omega_0} - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{d0} \right) \times \\ & \times \left\{ \left(i\frac{\Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} + U \cos \theta_0 \right) \left(x_d z_B - i\frac{\Omega}{\omega_0} x_H^2 \right) + \left[i\frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right] \left(z_d z_B - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} x_H^2 \right) \right\} + \\ & + \frac{x_d - x_q}{\omega_0} z_B I_{q0} \left\{ z_q \left(i\frac{\Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} - U \cos \theta_0 \right) - \left(i\frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right) x_q \right\} - \\ & - i\frac{\Omega}{\omega_0} x_H \frac{x_H I_{q0}}{\omega_0} \left\{ \left(i\frac{\Omega}{\omega_0} x_q I_{q0} + U \cos \theta_0 \right) z_q \right\} - \left[i\frac{\Omega}{\omega_0} (x_H i_{B0} - x_d I_{d0}) + U \sin \theta_0 \right] x_q \Delta\theta_{10} = \\ & = - \left\{ \left(\frac{x_H i_{B0}}{\omega_0} - \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{d0} \right) \left(z_d x_H - i\frac{\Omega}{\omega_0} x_H x_d \right) + \frac{x_d - x_q}{\omega_0} I_{q0} \left(i\frac{\Omega}{\omega_0} x_H z_B + x_H x_q \right) + \frac{x_H}{\omega_0} I_{q0} (z_d z_q + x_d x_q) \right\} \Delta U_{B0}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $a_{i,k}$ - коэффициенты линеаризованной системы установившихся вынужденных крутильных колебаний ступеней турбины на частоте сканирования. Уравнение (4) позволяет найти амплитуду и фазу угла качания ротора генератора $\Delta\theta_{10}$ в зависимости от частоты сканирования Ω . Одновременно обеспечивается расчет амплитуды и фазы установившихся колебаний любой секции валопровода турбины.

Результаты расчёта по уравнению (4) амплитуды угла качания для второй ступени турбоагрегата показаны на рис.3.

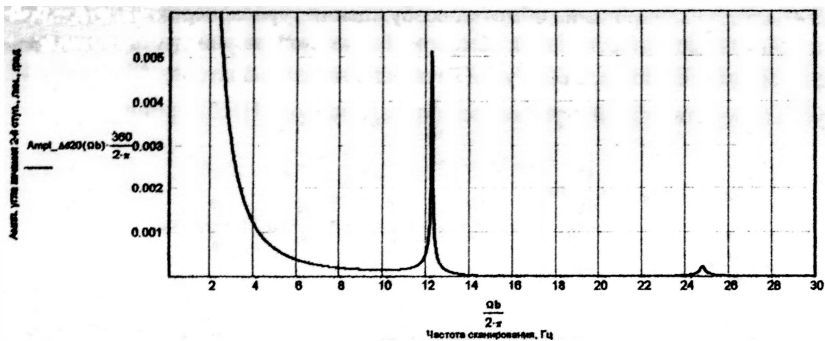


Рис.3. Амплитуда угла качения второй ступени турбогенератора. По оси абсцисс частота сканирования обмотки возбуждения в Гц, по оси ординат угол качения в градусах.

Проведена оценка области наблюдаемости хронометрического отклика каждой из пяти ступеней турбоагрегата при сканировании обмотки возбуждения напряжением генератора пробных воздействий. Значение отклика для частоты вращения 50 Гц определялось по формуле $\tau = \Delta\theta_n / 314 \text{ рад/с}$, где $\Delta\theta_n$ - угол качения n -й ступени. На рис. 4. изображено семейство кривых $\tau_{10}(\Delta U_B)$ соответствующих первой ступени (ротору генератора), для различных (0.1, 0.5, 1, 3, 5, 10 Гц) значений частоты сканирования обмотки возбуждения.

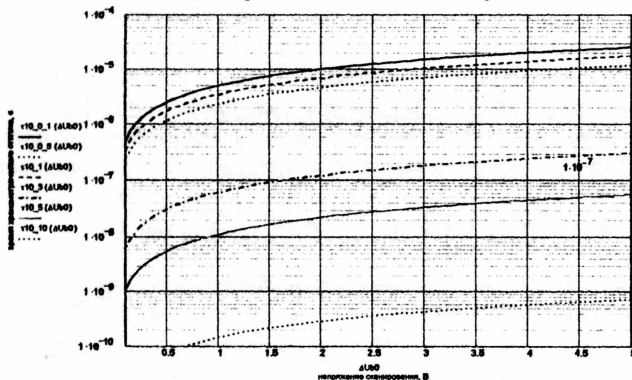


Рис. 4. Хронометрический отклик первой ступени (ротора генератора). По оси x - напряжение сканирования ΔU_B , В, подаваемое генератором тестовых воздействий; по оси y -- время хронометрического отклика τ_{10} , с.

Область на рис.4 выше ординаты $1 \cdot 10^{-7}$ с является наблюдаемой. Следует отметить, что применение методов усреднения, в частности синхронного накопления, позволяет фазо-хронометрической системе работать с более кратковременными откликами.

Пятая глава описывает проектирование и изготовление электронной части измерительного модуля системы фазо-хронометрического сопровождения. Блок-схема измерительного модуля показана на рис.5.



Рис.5. Блок-схема измерительного модуля системы фазо-хронометрического сопровождения турбоагрегата.

Были изготовлены и установлены на турбоагрегате №5 ТЭЦ-23 два измерительных модуля для работы в составе системы фазо-хронометрического сопровождения: один в районе стыковки возбудителя с генератором, другой в районе цилиндра высокого давления.

Шестая глава посвящена оценке результатов измерительного контроля. Представлены экспериментальные данные, полученные на турбоагрегате №5 ТЭЦ-23. Рассмотрены составляющие погрешности ИВФХС: вносимые пассивным индукционным преобразователем - менее $4 \cdot 10^{-8}$ с, электронным блоком обработки - менее $1 \cdot 10^{-7}$ с, системой измерения интервалов времени - менее $1 \cdot 10^{-7}$ с, оптоволоконной линией связи - менее $1 \cdot 10^{-9}$ с. Полученная погрешность системы не превышает $1 \cdot 10^{-7}$ с и может уменьшаться благодаря совершенствованию элементной базы и методов обработки. Относительная погрешность измерения периода вращения ротора составляет $\delta < \frac{1 \cdot 10^{-7} \text{ с}}{0,02 \text{ с}} \cdot 100 \% = 0,0005 \%$.

Седьмая глава содержит расчетно-теоретическое исследование применимости различных электрических датчиков, входящих в состав фазо-хронометрической системы для контроля дефектов сплошности (трещин) в ферромагнитных деталях циклических машин и механизмов.

Проведены исследования применимости резонансных индукционных датчиков при контроле состояния поверхности металла ходовых частей циклических машин и механизмов. При этом система контроля состоит из сканирующего поверхность датчика - резонансного регистрирующего контура, который подсоединяется через подводящий кабель к генератору высокочастотных гармонических колебаний, осуществляющему накачку резонансного контура, и электронного блока обработки и отображения. Составлена математическая модель датчика и проведён методом конечных разностей расчёт его реакции на импульсное входное воздействие от дефекта сплошности,

представленное как приращение индуктивности датчика

$$L_{in}(t) = L_{in0} \left(th \frac{1}{\tau_1} (t - t_1) - th \frac{1}{\tau_2} (t - t_2) \right), \quad (5)$$

где L_{in0} – эквивалентная вносимая индуктивность, t – текущее время; t_1 – момент начала нарастания входного воздействия; t_2 – момент начала спада входного воздействия; τ_1 и τ_2 – длительности нарастания и спада входного воздействия.

Показана принципиальная возможность регистрации резонансным индукционным датчиком даже слабых сигналов в условиях сильных промышленных помех при использовании метода синхронного накопления.

Исследовано и математически смоделировано применение для контроля циклических машин и механизмов автогенераторных датчиков (рис.6).

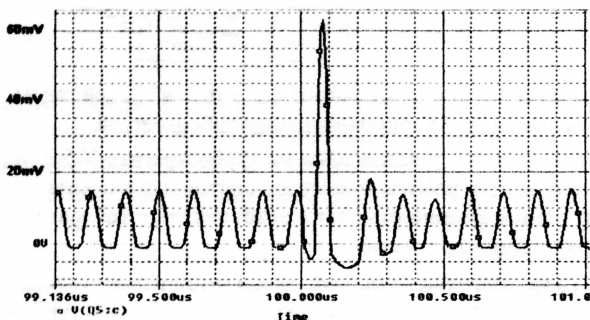


Рис. 6. Реакция автогенераторного датчика на входное импульсное воздействие, по оси x - время, 10^{-6} с, по оси y - напряжение, 10^{-3} В.

Установлено, что моменты срыва и восстановления колебаний автогенератора могут быть зарегистрированы и использованы в системе фазо-хронометрического контроля циклических машин и механизмов.

Исследована возможность применения преобразователей Холла для контроля колёсных пар подвижного состава. Для формирования опорных импульсов при фазо-хронометрическом контроле использованы синхрометки, располагающиеся на ободе колеса. В режиме сканирования система обеспечивает синхронное накопление сигнала $S=S(t_i)$, где t_i – момент измерения. Полученная таким образом статистика сигнала за несколько циклов сканирования позволяет осуществлять его последующее усреднение.

Общие выводы и результаты работы.

Теоретически и экспериментально показана перспективность применения средств и методов фазо-хронометрического сопровождения для обеспечения мониторинга технического состояния функционирующих машин и механизмов циклического действия:

- проведено сопоставление существующих методов сопровождения циклических машин и механизмов и показаны преимущества фазо-хронометрического метода перед традиционными амплитудными, достигаемые благодаря рекордному метрологическому уровню современной хронометрии;

- математическая модель турбоагрегата представлена в приближении многомассовой системы, состоящей из массивных дисков, динамически эквивалентных секциям турбины и генератору, и упругих стержней эквивалентных секциям валопровода;

- линеаризована математическая модель турбоагрегата; полученная модель позволяет рассчитывать хронометрические отклики ротора генератора и всех ступеней турбины на тестовые воздействия;

- расчетно-теоретически показано, что низковольтный (2-3 В) и слаботочный (0.3-30 А) генератор тестовых гармонических воздействий при его мощности $\sim 10^{-6}$ от номинальной мощности тестируемого синхронного генератора (250 МВт), способен обеспечить на всех ступенях турбоагрегата уровень фазо-хронометрического отклика на тестовое воздействие, достаточный для изучения технического состояния турбоагрегата;

- спроектирован измерительный модуль системы фазо-хронометрического сопровождения турбоагрегата, которая изготовлена и установлена на турбоагрегате №5 ТЭЦ-23 г.Москва;

- получены и приведены экспериментальные данные при работе на реальном турбоагрегате, которые согласуются с данными, полученными математическим моделированием;

- применен метод синхронного накопления сигнала при обработке экспериментальных данных, полученных от системы фазо-хронометрического контроля на фоне помех;

- оценена суммарная погрешность экспериментальной системы фазо-хронометрического контроля и её отдельных составляющих, оценена исходная погрешность метода системы фазо-хронометрического контроля, которая уже сегодня составляет не хуже $\pm 10^{-7}$ с, разработаны рекомендации по использованию экспериментальных данных при уточнении ранее полученных математических моделей;

- теоретически и экспериментально показана возможность применения электрических преобразователей (резонансного, индукционного, холловского, автогенераторного), применяемых обычно в аналоговых режимах, для получения дискретных фазо-хронометрических отсчетов при измерительном контроле технического состояния циклических машин и механизмов, а также при дефектоскопии поверхности их ходовых частей.

Полученные результаты могут служить основой при разработке и создании новой фазо-хронометрической подсистемы применяемого на турбоагрегатах контрольно-диагностического комплекса. Её задача – измерительно-вычислительный мониторинг параметров крутильных колебаний ротора турбогенератора и секций валопровода турбины с целью оценки технического состояния функционирующего турбоагрегата и его аварийной защиты. Затраты на создание встроенной фазо-хронометрической подсистемы для регистрации параметров крутильных колебаний валопровода турбоагрегата с целью обеспечения мониторинга его технического состояния имеют величину всего 2.6 млн. рублей, а общие убытки при аварийном выходе турбоагрегата из строя – не менее 1 млрд. рублей. Поэтому, представляется целесообразным оснащение парка действующих турбоагрегатов подобными встроенными фазо-хронометрическими подсистемами.

Публикации по теме диссертации.

1. Темнов В.С. Исследование применимости резонансного индукционного датчика при контроле роторных агрегатов // Измерительная техника. – 2003. - №5. - С. 29-31.
2. Темнов В. С. Исследование возможности регистрации дефектов роторных систем с помощью магнитометрического преобразователя Холла // Измерительная техника. - 2003. - №6. - С. 31-33.
3. Темнов В.С. Повышение достоверности контроля качества стенок магистральных нефтепроводов на основе измерительно-вычислительной системы сверхвысокого разрешения // Диагностика трубопроводов: Тез. докл. 3-й Международной конф. – М., 2001. – С. 282.
4. Киселёв М.И., Пронякин В.И., Темнов В.С. Применение системы магнитного мониторинга для выявления зарождающихся дефектов в ответственных роторных механизмах и оценка их ресурса // Проблемы машиноведения: Тез. докл. 2-й Научно-технической конференции, посвященной 15-летию Н.ф. ИМАШ РАН. - Нижний Новгород, 2001. - С. 45.
5. Темнов В.С. Исследование применимости электродинамического датчика в системах хронометрического контроля. // Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. 8-й Всероссийской научно-технической конф. – М., 2002. - С. 159.
6. Темнов В.С. Хронометрический контроль дефектов элементов роторных систем на основе гальваномангнитных преобразователей. // Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. 8-й Всероссийской научно-технической конф. – М., 2002. - С. 160.
7. Темнов В.С. Контроль состояния поверхности роторных машин автономным методом // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 7-го Всероссийского Сопоставления-семинара, с участием представителей стран СНГ. – М., 2003. – С. 169.
8. Многофакторная математическая модель функционирования турбогенератора / М.И. Киселев, В.И. Пронякин, В.С. Темнов и др. // Чкаловские чтения: Сб. материалов 5-й Международной научно-технической конференции. – Егорьевск, 2004. – С. 105.
9. Темнов В.С. Измерительный модуль системы фазо-хронометрического контроля турбоагрегата // Состояние и проблемы измерений: Тез. докл. 9-й Всероссийской научно-технической конф. – М., 2004. - С. 101.
10. Темнов В.С. Использование электрических датчиков в системе фазо-хронометрического контроля технического состояния циклических машин и механизмов // Образование через науку: Сборник тезисов докладов Международного симпозиума, посвященного 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2005. – С.288.
11. Темнов В.С. Приборное и расчетно-теоретическое обеспечение фазо-хронометрических измерений // Фридлиендеровские чтения VРВ-5. Седьмая сессия международной научной школы “Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов”. – СПб., 2005. – С.120.
12. Киселёв М.И., Пронякин В.И., Темнов В.С. Расчет хронометрического отклика турбоагрегата на синусоидальное тестовое воздействие // Измерительная техника. - 2005. - №10. - С. 48-50.