

На правах рукописи
УДК 519.711.3: 62-50

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

НАЗОЛИН Андрей Леонидович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ХРОНОМЕТРИИ ДИНАМИКИ ЦИКЛИЧЕСКИХ
МЕХАНИЗМОВ**

**05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных
исследованиях**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва, 2000

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

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., проф. М.И. Киселев

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н., проф. А.И. Чуличков

к. ф.-м. н. В.И. Цепляев

Ведущая организация: Нижегородский филиал института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

Защита состоится "14" марта 2000г. в 11³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 053.15.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я

библиотеке МГТУ.

направить по адресу: 107005,

2000г.

1565287

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана

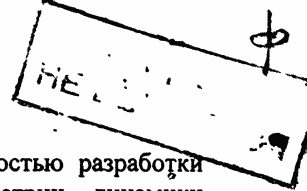


1565287

Назюлин А. Л. Математическо

Волков И.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность проблемы продиктована необходимостью разработки общего математического описания процесса хронометрии динамики циклических механизмов и исследования его особенностей с помощью современных математических методов и вычислительной техники. Это позволит определить потенциальные возможности временных измерений по исследованию динамики циклических механизмов.

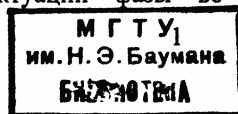
Важное прикладное значение имеет разработка нового поколения многофакторных математических моделей динамики циклических механизмов (редукторы, часовые механизмы, подшипники, турбогенераторы и т.д.) с учетом процедур временных измерений для анализа и интерпретации экспериментальных данных, полученных в ходе временных измерений. Перспективным методом, существенно расширяющим класс исследуемых объектов в хронометрическом представлении, является численное моделирование динамики циклических механизмов на ЭВМ, так как аналитические методы решения дифференциальных уравнений не всегда позволяют получить в явном виде зависимость текущего времени от координаты.

1565284 Недостаточное развитие хронометрического метода исследования по сравнению с традиционными амплитудными (виброакустическими) и фазовыми методами, в основном объясняется тем, что до последнего времени не было адекватных технических средств, позволяющих проводить проверку математической модели по экспериментальным данным. Однако с прогрессом, достигнутым в последние годы в информационно-измерительных хронометрических системах, важное научное и прикладное значение приобретают исследования потенциальных возможностей процедур временных измерений не только для контроля, но и диагностики параметров технического состояния циклических механизмов.

Целью работы является исследование с помощью современных математических методов и вычислительной техники особенностей процесса хронометрии динамики циклических механизмов; разработка и анализ математических моделей динамики циклических механизмов с учетом процедур временных измерений; определение класса механизмов циклического действия, для которых временные измерения являются перспективными.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- получено выражение для преобразования флуктуаций (вариаций) фазы рабочего цикла циклических механизмов во флуктуации (вариации) временных интервалов и исследованы особенности процедур измерений текущего периода, приводящие к появлению нулей спектральной мощности в частотной области;
- проведено общее описание преобразования флуктуаций фазы во



флуктуаций периода с использованием многомерных характеристических функций и показано, что флуктуации периода представляют собой немарковский случайный процесс;

- показано, что информация о вибрации циклического механизма при временных измерениях содержится в спектре квадрата второй производной флуктуаций текущего периода.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

- определены потенциальные возможности временных измерений по оценке технического состояния циклических механизмов;
- разработан пакет прикладных программ, реализующий математическую модель динамики часового механизма с несвободным ходом;
- разработан метод оценки качества изготовления, монтажа и работы часовой зубчатой передачи часового механизма с несвободным ходом по результатам измерений текущего периода колебаний баланса;
- предложен алгоритм оценки кинематической погрешности редуктора по результатам измерений текущего времени и показано, что оценку кинематической погрешности можно проводить по измерениям вариаций текущего времени с одного датчика.

Результаты диссертации использовались в госбюджетных работах по темам: №2150 "Разработка частотно-хронометрического метода измерительного контроля и диагностики циклических машин и механизмов и его математическое моделирование" (1997,1998 г.г.), Гос. Регистрация № 01980001425; "Исследование немарковских случайных процессов в технических системах" грант Президента РФ № 96-15-97201.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Теоретическое описание процесса хронометрии динамики циклических механизмов.
2. Математическая модель динамики часового механизма с несвободным ходом в хронометрическом представлении.
3. Экспериментальные и теоретические результаты исследований динамики часового механизма, редуктора и турбоагрегата.

Достоверность и обоснованность основных научных положений подтверждается сравнением результатов математического моделирования динамики циклических механизмов в хронометрическом представлении с результатами экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Третьем, Четвертом и Пятом Международных совещаниях-семинарах "Инженерно-физические проблемы новой техники" (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994, 1996, 1998 г.г.), Международных научно-технических конференциях "Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники" (г. Егорьевск, 1995, 1997 г.г.), "Состояние и проблемы технических измерений" (г. Москва, МГТУ им

Н.Э. Баумана 1994, 1995, 1997 г.г.), мини-симпозиуме “Методы теории информации в решении инженерно-физических проблем” (г. Нижний Новгород НФ ИМАШ РАН 1998 г.), Научно-технической конференции, посвященной 10-летию НФ ИМАШ РАН (г. Нижний Новгород 1997 г.), 8-й сессии Российского акустического общества “Нелинейная акустика твердого тела” (г. Нижний Новгород 1998 г.), Пятой Международной конференции, посвященной 275-летию РАН (г. Нижний Новгород, 1999 г.), а также на постоянно действующих научных семинарах ряда кафедр МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано: 8 статей и 19 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Текст изложен на 151 машинописных страницах, включая 58 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована ее цель и определены научная новизна и практическая ценность работы. Дана краткая характеристика работы по главам.

В первой главе проведено статистическое описание флуктуаций временных интервалов механизма циклического действия.

Рассмотрены три процедуры временных измерений: текущего периода, временных интервалов и текущего времени. В первом приближении получено решение интегрального соотношения

$$2\pi = \int_0^{T(t)} \dot{\varphi}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

связывающего текущий период $T(t) = T_0 + \delta T(t)$ с угловой скоростью вращения (колебания) $\dot{\varphi}(t) = \omega_0 + \delta\dot{\varphi}(t)$ циклического механизма:

$$\delta T(t) = -\frac{T_0}{2\pi} (\delta\varphi(t + T_0) - \delta\varphi(t)), \quad (2)$$

где T_0 - средний период, δT – флуктуации текущего периода, $\delta\varphi$ - флуктуации угла.

Получены спектральные и временные окна процедур временных измерений, связывающих флуктуации (вариации) угла циклического механизма с флуктуациями (вариациями) временных интервалов. Исследованы особенности преобразования флуктуаций угла $\delta\varphi(t)$ во флуктуации текущего периода $\delta T(t)$, приводящего к появлению нулей спектральной мощности в частотной области:

$$G_{\delta T}(\omega) = \frac{T_0^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\omega T_0}{2}\right). \quad (3)$$

Так, из вида (3) следует, что при измерениях текущего периода отсутствует возможность регистрировать процессы на частотах, кратных по целому числу средней частоте вращения (колебания). На рис. 1 представлены спектральные окна процедур измерения текущего периода $G_{\delta T}(\omega)$ и временных интервалов между соседними метками $G_{\delta \tau}(\omega)$.

Анализ результатов численного моделирования (1) на ЭВМ показал, что первое приближение для интегрального соотношения (1) верно при относительно уровне флуктуаций временных интервалов не более 10%, что соответствует стационарному режиму работы большинства циклических механизмов. Увеличение интенсивности флуктуаций приводит к изменению функции распределения флуктуаций периода и низкочастотной фильтрации в частотной области.

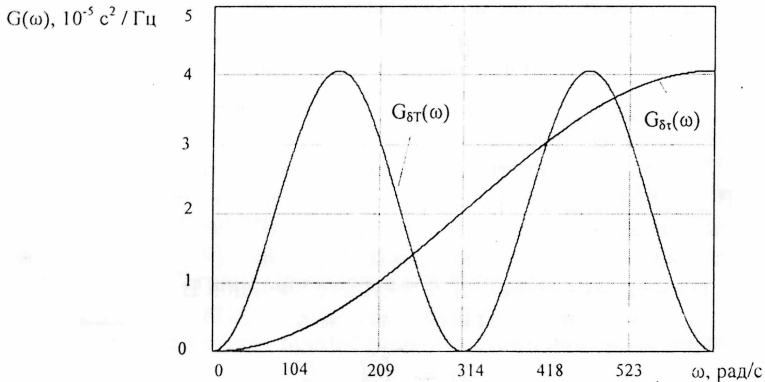


Рис. 1.

Получено решение стохастического дифференциального уравнения вращательного движения жесткого вала без упругих элементов в хронометрическом представлении и показано, что флуктуации фазы и периода представляют собой немарковский случайный процесс. Так, как интенсивность флуктуаций периода от механического шума убывает как $\sim 1 / \omega^2$, поэтому, чем выше частота флуктуаций момента на валу, тем более точные временные измерения необходимы для их регистрации.

С использованием многомерных характеристических функций проведено общее описание преобразования флуктуаций фазы в флуктуации периода, идущее с понижением порядка характеристической функции в два раза. Приведены примеры нахождения характеристических функций флуктуаций периода для процессов $\delta\phi(t)$, представляющих собой винеровский, пуассоновский и дельта коррелированный гауссовский случайные

процессы. Показано, что флуктуации периода циклического механизма даже в рассмотренных простых случаях представляют собой немарковский случайный процесс.

Исследованы методы интегральной оценки информации, содержащейся в результатах временных измерений. Численное моделирование показало, что необходимо разделить оценки информации по гистограмме и спектру, а мера Кульбака является наиболее чувствительной нелинейной интегральной числовой характеристикой, характеризующей степень отличия распределения от заданного.

Во второй главе проведено математическое моделирование процесса измерения вариаций временных интервалов рабочего цикла механизма циклического действия.

Дана краткая характеристика методов решения дифференциальных уравнений динамики циклических механизмов в хронометрическом представлении и определены возможные источники вариаций временных интервалов рабочего цикла.

Получены выражения, устанавливающие зависимость вариаций углов входного и выходного звена многозвенного циклического механизма и их относительной неравномерности вращения с вариациями временных интервалов. Для вариаций текущего периода вращения выходного звена, найденное выражение имеет вид:

$$\delta T_2(t) = -\frac{T_2}{2\pi} \left[\delta F(t + T_2) - \delta F(t) + \frac{1}{U} (\delta \varphi_1(t + T_2) - \delta \varphi_1(t)) \right], \quad (4)$$

где: $\delta F(t)$ – неравномерность вращения выходного звена относительно входного, U – идеальное передаточное отношение механизма. T_2 – средний период вращения выходного звена. Особенностью процедуры измерения текущего периода, в отличие от измерений временных интервалов и текущего времени, является отсутствие систематической погрешности измерений, связанной с неравномерности пространственного расположения соседних меток углового положения. Показано, что относительная неравномерность вращения валов $\delta F(t + T_2) - \delta F(t)$ характеризует внутренние периодические закономерности функционирования, обусловленные кинематическими и динамическими процессами в механизме. Доказано, что в вариациях текущего времени и фазы содержится эквивалентная информация о динамике вращательного движения многозвенных циклических механизмов при стационарном режиме работы, независимо от места установки датчика измерительной системы.

Операционным методом получено решение системы линейных стохастических дифференциальных уравнений вращательного движения вала с двумя массивными дисками и упругой передающей связью в хронометрическом представлении и показано, что вариации периода обусловлены крутильными колебаниями вала, а функция неравномерности вращения характеризует скручивание вала.

Проведено математическое моделирование динамики вращательного движения вала в хронометрическом представлении при изменении внешнего момента на валу по импульсному закону. Показано, что вариации фазы и вариации текущего периода в общем случае различны, так как связаны спектральным окном процедуры измерения (3). Однако, если частоты внешних воздействий не кратны основной частоте вращения или измерение текущего периода проводится не более двух раз за цикл, то вариации периода во временной области представляют собой зеркальное отражение вариаций фазы.

Предложена математическая модель, описывающая связь вибраций рамы, на которую установлен датчик информационно-измерительной хронометрической системы с вариациями временных интервалов:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_c^2 x = A(t)\sin(\omega t) + \xi(t), \quad (5)$$

$$\delta T(t) = -(x(t + T_0) - x(t))/\omega_0 R, \quad (6)$$

где: $x(t)$ – координата горизонтального сдвига рамы относительно оси вращения вала; β – коэффициент затухания рамы; ω_c – собственная круговая частота рамы; $A(t)$ – амплитуда внешней силы на частоте ω , нормированная на массу рамы; $\xi(t)$ – случайные ускорения вибрации рамы, $\omega_0 = 2\pi/T_0$ – средняя циклическая частота вращения вала; R – радиус измерительного диска.

Показано, что информация о вибрации рамы содержится в вариациях временных интервалов, причем отсутствие отличия от типично белого шума спектральной мощности флуктуаций не гарантирует отсутствие явных спектральных линий в спектре квадрата флуктуаций. Так как флуктуации амплитуды колебаний рамы с дисперсией, изменяющейся по гармоническому закону, дают в спектре квадрата второй производной текущего периода спектральные линии на удвоенной частоте колебаний.

Проведено численное моделирование динамики коромысла одноканального вариометра в хронометрическом представлении. Установлено, что вариации периода возмущаются только во время внешних воздействий и абсолютно их не запоминают, поэтому потенциальные возможности динамического метода оценки вторых производных гравитационного потенциала связаны с прецизионными измерениями среднего периода колебаний коромысла для восстановления собственной частоты колебаний.

Предложен и обоснован алгоритм оптимизации работы одноканального вариометра по результатам угловых измерений методом наименьших квадратов по формуле:

$$\hat{F}_k = \frac{1}{k} \left[\sum_k \ddot{\phi}_k + 2\beta \sum_k \dot{\phi}_k + \omega_0^2 \sum_k \phi_k \right], \quad (7)$$

где ϕ_k – текущий угол поворота коромысла, β – коэффициент затухания, $\hat{F}$ – момент силы по крутильной степени свободы, нормированный на момент

инерции коромысла. Вычислительный эксперимент показал, что благодаря априорной информации о конструктивных и физических параметрах вариометра время измерений можно сократить в 7 раз. На рис. 2. представлен сигнал, снимаемый с вариометра – 1 и сигнал, прошедший обработку - 2.

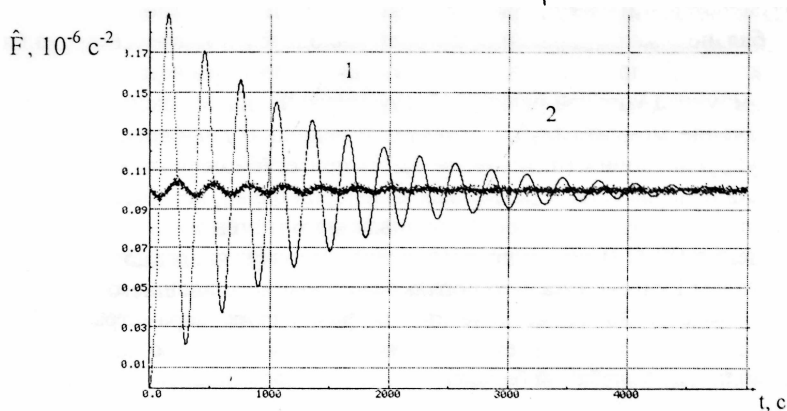


Рис. 2.

В третьей главе проведено исследование динамики несвободного спускового регулятора с использованием его математической модели.

Обоснована актуальность хронометрических исследований динамики часовых механизмов, связанная с неизохронностью колебаний баланса, и расчет динамики несвободного спускового регулятора (НСР) методом припасовывания.

Построена многофакторная математическая модель динамики НСР, который является основным элементом часового механизма. В математической модели учтены три новых этапа цикла, найдены прямые и обратные функциональные зависимости между ходовым колесом и балансом на всех этапах цикла. Математическая модель состоит из 14 непрерывно сопрягаемых этапов цикла, на каждом из которых решается своя система дифференциальных уравнений движения ходового колеса, баланса и упругой балки:

$$J_k \ddot{\varphi} = -M_k(\varphi) + \left(\rho_k(\varphi) + \mu r_k(\varphi) + r_2 \sqrt{1 + \mu^2} \right) N, \quad (8)$$

$$J_b \ddot{\psi} = -M_b(\psi) + \left(-\rho_b(\varphi) + \mu r_k(\psi) + r_1 \sqrt{1 + \mu^2} \right) N, \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned} EJ_z \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + F(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= P(x, t), \end{aligned} \right. \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi(\psi), \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{\varphi} &= \frac{d^2 \varphi}{d\psi^2} \dot{\psi}^2 + \frac{d\varphi}{d\psi} \ddot{\psi}, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где: $M_k(\varphi)$ - внешний момент на ходовом колесе; $M_b(\psi)$ - восстанавливающий момент упругой балки; $F(t)$ - сила трения в опорах упругой балки; $P(x,t)$ - интенсивность нагрузки на оси вращения баланса.

Решение дифференциального уравнения в частных производных (10) ищется разностным методом при нелинейных граничных условиях на оси вращения баланса, закон движения которой находится в процессе решения (8), (9). На рис. 3 представлен результат численного расчета восстанавливающего момента упругой балки, действующего на ось вращения баланса. Среднее значение момента $M_b(\psi)$ сходится к решению дифференциального уравнения упругой линии (отличие на 0,2%) при стационарных граничных условиях. Найдены частоты собственных колебаний балки, которые приводят к высокочастотным вариациям восстанавливающего момента.

Уравнения (8)-(12) образуют замкнутую систему, численное решение которой методом Рунге-Кутты 4-го порядка для заданного внешнего момента на ходовом колесе, 30 геометрических и физических параметров НСР, позволяет рассчитать выходные параметры работы часового механизма: период и амплитуду колебаний баланса.

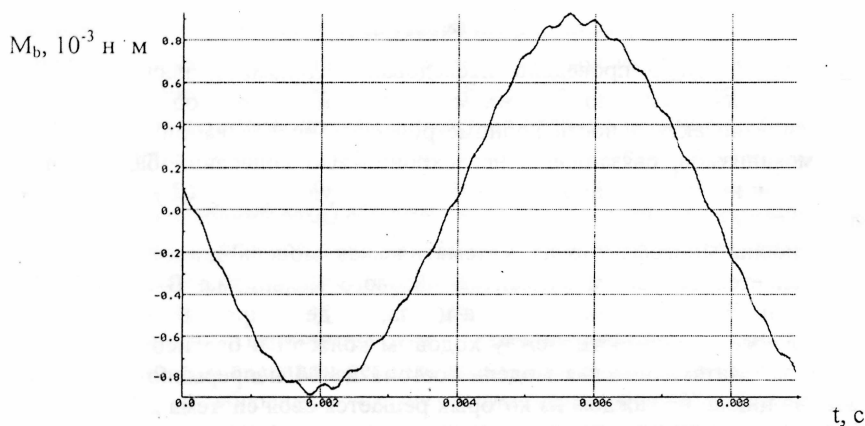


Рис. 3.

Построенная математическая модель динамики НСР дает возможность исследовать его работу и диссипативные процессы в нем. Для этого была разработана прикладная программа, которая позволяет проводить вычислительные эксперименты с целью интерпретации экспериментальных данных, полученных при записи периода колебаний баланса часового механизма с несвободным ходом. Проведен анализ погрешностей численного решения системы дифференциальных уравнений, исследована устойчивость и сходимость.

Проведен однофакторный анализ влияния конструктивных и физических параметров несвободного спускового регулятора на период и

амплитуду колебаний баланса, который выявил линейную зависимость между ними. Исследована причина неизохронности колебаний баланса, обусловленная конструкцией НСР. Вычислительный эксперимент показал, что увеличение внешнего момента на ходовом колесе приводит к уменьшению периода и увеличению амплитуды колебаний баланса, а вариации амплитуды и периода колебаний связаны спектральным окном процедуры измерения (3) (см. рис. 1).

Таким образом, потенциальные возможности хронометрических исследований динамики часового механизма с несвободным ходом связаны с регистрацией вариаций геометрических параметров в спусковом регуляторе, восстановлением вида зацепления часовой зубчатой передачи и внешнего момента, создаваемого пружинным двигателем.

В четвертой главе проведен анализ результатов временных измерений и проверка разработанных математических моделей.

Дано краткое описание работы и состава информационно-измерительной хронометрической системы по исследованию динамики часовых механизмов, редукторов, турбоагрегатов. Проведено математическое моделирование восстановления огибающей гауссовского видеоимпульса на выходе фотодиода с учетом внутреннего теплового шума, которое позволило установить, что плотность распределения вероятности времени срабатывания по порогу имеет гауссовский вид. Получено выражение для погрешности формирования импульсного сигнала по фронту видеоимпульса, позволившее провести оптимизацию параметров первичного преобразователя:

$$\delta\tau(\tau, t) = \tau \pm \frac{a^2 \sqrt{kTR}}{A \cdot t \cdot \sqrt{\tau}} \exp\left(\frac{t^2}{2a^2}\right), \quad (13)$$

где: A - амплитуда сигнала; a - длительность видеоимпульса на уровне $A/\sqrt{e}$. На рис. 4 представлена зависимость точности регистрации момента прихода информационного видеоимпульса от постоянной времени τ и момента срабатывания t .

Получено выражение, связывающее интенсивность шумов измерительной системы с интенсивностью флуктуаций текущего периода, из которого следует, что интенсивность электронного шума, в отличие от механического шума циклического механизма, равномерна во всем частотном диапазоне флуктуаций текущего периода.

Проверена адекватность математической модели динамики часового механизма ЧМ-30 результатам измерений периода колебаний баланса бесконтактным фотоэлектрическим методом. На рис. 5 представлен фрагмент автокорреляционной функции $\rho_1(N_T)$ периода колебаний баланса ЧМ-30 и его взаимной корреляционной функции $\rho_2(N_T)$ с данными вычислительного эксперимента. Величина взаимной корреляции равна $\rho(\rho_1, \rho_2) = 0,95 \pm 0,09$ (0,68).

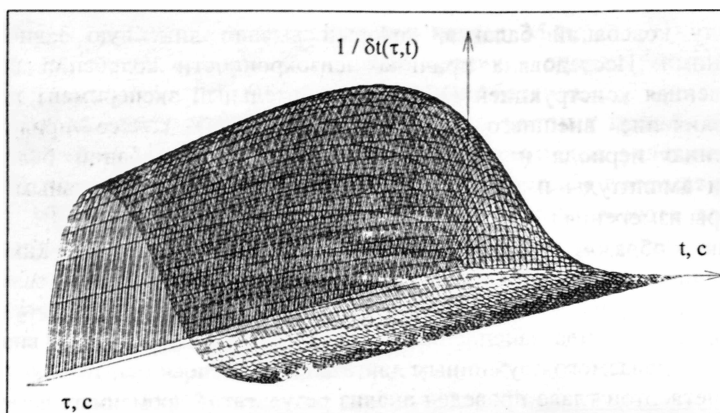


Рис. 4.

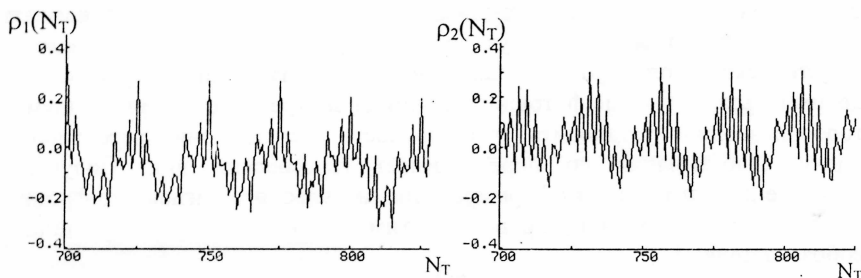


Рис. 5.

Установлено, что долговременный тренд периода колебаний обусловлен уменьшением момента, создаваемого пружинным двигателем при увеличении угла раскрутки его спирали, и является оценкой характеристики спуска заводной пружины. Работа зубчатой передачи проявляется в виде периодических изменений периода колебаний баланса, вызванных изменением вращающего момента в часовом зацеплении. Спектральный анализ вариаций периода позволяет по частотам гармоник определить источник изменения внешнего момента, а по значениям амплитуд - вид дефекта часового зацепления. Предложен алгоритм оценки вида зацепления по асимметрии взаимных нормированных корреляционных функций периода колебаний баланса с результатами вычислительного эксперимента, выполненного при малом, нормальном и глубоком зацеплении. Выявлена возможность оценки текущего технического состояния часовой зубчатой передачи по трем интегральным параметрам периода колебаний баланса: асимметрии, дисперсии и мере Кульбака в спектральной области.

Проведены экспериментальные исследования динамики редукторов на

разработанной информационно-измерительной хронометрической системе, которые подтвердили, что результаты измерений временных интервалов и углов поворота валов связаны выражениями, полученными в главе 2. Предложен алгоритм расчета кинематической погрешности по формуле

$$\delta F(k) = \frac{2\pi}{N_2} k - \frac{2\pi}{N_1 U} \left(n + \frac{t_k - t_n}{t_n - t_{n-1}} + n_0 \right), \quad (t_{n-1} < t_k < t_n), \quad (14)$$

где t_n , t_k – текущее время прохождения входным валом n -го и выходным валом k -го фиксированного углового положения. N_1 , N_2 – число меток углового датчика. Теоретически и экспериментально показано, что достаточно одного датчика углового положения для оценки кинематической погрешности редуктора по вариациям текущего времени. Экспериментально установлено, что в вариациях временных интервалов содержится информация о нелинейных параметрических свойствах динамики редуктора.

Проведено исследование текущего периода вращения валопровода турбоагрегата ТЭЦ с использованием информационно-измерительной хронометрической системы. Дана оценка систематической погрешности измерений временных интервалов между соседними пазами измерительного диска и возможностей информационно-измерительной системы по выделению единичных низкочастотных событий, периодических широкополосных событий и узкополосных сигналов. Вид спектра текущего периода вращения соответствует спектральному окну этой процедуры измерения (3). Проведен анализ работы турбоагрегата в переходных режимах и обнаружены частоты вариаций периода, косвенно идентифицируемые как частоты крутильных колебаний вала. По равномерной интенсивности “холмов” в высокочастотной области спектра дана оценка дисперсии собственного шума измерительной системы.

Представлен алгоритм расчета дисперсии флуктуаций внешнего момента на валу $\sigma_{M,n}^2$ при различных положениях валопровода турбоагрегата по дисперсии квадрата центральной разности второго порядка δ_T^2 периода вращения:

$$\sigma_{M,n}^2 = \frac{\sqrt{2\pi} N_0^2 J}{T_0^3} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_T^2(t_k + n\Delta t), \quad (15)$$

где N_0 – число пазов измерительного диска, N – текущий период вращения, n – номер паза. На рис. 6 представлен годограф среднего квадратичного отклонения $\sigma_{T,n}$ флуктуаций второй производной текущего периода вращения валопровода по 12 пазам и амплитудный спектр $G_{\delta_T^2}(f)$ квадрата второй производной флуктуаций текущего периода. Амплитуда спектральных линий зависит от ориентации датчика в горизонтальной или вертикальной плоскости симметрии. Из рис. 6 следует, что результаты обработки текущего периода вращения валопровода хорошо согласуются с результатами

математического моделирования, влияния вибраций рамы датчика на результат временных измерений, выполненными в главе 2,

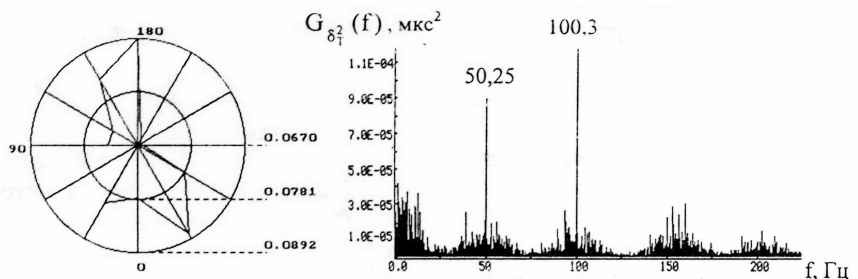


Рис. 6.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложении представлены исходные геометрические и физические параметры несвободного спускового регулятора и возможные режимы расчета математической модели динамики часового механизма ЧМ-30.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены линейные выражения для временного и спектрального преобразования флуктуаций (вариаций) фазы циклических механизмов во флуктуации (вариации) временных интервалов и определены границы их применимости. Исследованы особенности процедуры измерения текущего периода, приводящие к появлению нулей спектральной мощности в частотной области.
2. Проведено общее описание преобразования флуктуаций фазы во флуктуации периода с использованием многомерных характеристических функций и показано, что флуктуации периода представляют собой немарковский случайный процесс.
3. Исследованы методы интегральной оценки информации при анализе результатов временных измерений. Установлено, что мера Кульбака наиболее чувствительна к изменениям формы распределения и спектральной мощности, чем другие числовые характеристики.
4. Получены выражения, устанавливающие связь вариаций углов поворота входного и выходного звеньев циклического механизма и их относительной неравномерности вращения с вариациями временных интервалов. Показано, что в вариациях фазы и текущего времени содержится эквивалентная информация о кинематике и динамике вращательного движения звеньев циклического механизма в стационарном режиме функционирования.

5. Изучено влияние внешних детерминированных периодических процессов и внутренних резонансных явлений на результат временных измерений. Установлено, что отношение амплитуд гармоник в спектре вариаций фазы к амплитудам гармоник в спектре вариаций периода определяется спектральным окном процедуры временных измерений.
6. Проведено исследование влияния вибраций циклического механизма на результат временных измерений. Показано, что информация о вибрации циклического механизма при временных измерениях содержится в спектре квадрата второй производной флуктуаций текущего периода, если флуктуации амплитуды колебаний датчика идут с дисперсией, изменяющейся по гармоническому закону.
7. Предложен алгоритм оптимизации работы одноканального вариометра по результатам фазовых измерений методом наименьших квадратов за счет априорной информации о конструктивных и физических параметрах прибора. Математическое моделирование показало, что характерное время оценки вторых производных гравитационного потенциала может быть сокращено в 7 раз.
8. Построена многофакторная математическая модель динамики несвободного спускового регулятора часового механизма ЧМ-30 в хронометрическом представлении, которая учитывает три новых этапа цикла. Найденные прямые и обратные кинематические зависимости между ходовым колесом и балансом на всех этапах взаимодействия. Получено решение дифференциального уравнения динамики упругой балки разностным методом с учетом силы трения и реакции в опорах при изменяющихся граничных условиях, что позволило рассчитать восстанавливающий момент упругой балки при изменении длины одного из плеч балки.
9. Разработан пакет прикладных программ, реализующий математическую модель динамики часового механизма с несвободным ходом в хронометрическом представлении на ЭВМ. По результатам вычислительного эксперимента изучено влияние конструктивных и физических параметров часового механизма на период и амплитуду колебания баланса. Проведена проверка восстанавливающего момента упругой балки, полученного из решения дифференциального уравнения динамики, по известному решению статической задачи при одинаковых граничных условиях, которая выявила относительную ошибку в 0,2%. Рассчитаны собственные частоты колебаний балки, которые не влияют на результат временных измерений, так как лежат в высокочастотной области спектра. Исследована причина возникновения неизохронности колебаний баланса.
10. Решена задача математической оптимизации параметров первичного преобразователя для прецизионной регистрации момента прихода информационного видеоимпульса. Дана оценка дисперсии момента формирования импульсного сигнала по фронту гауссовского

видеоимпульса.

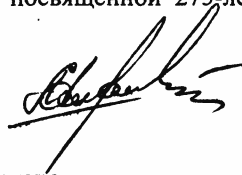
11. Теоретически и экспериментально показано, что временные измерения периода колебаний баланса перспективны как для повышения информативности испытаний, так и для сокращения объема измерений при диагностическом контроле часовых механизмов. Разработан метод оценки качества изготовления, монтажа и работы часовой зубчатой передачи часового механизма с несвободным ходом по трем интегральным параметрам.
12. Получен алгоритм оценки кинематической погрешности редуктора по результатам измерений текущего времени и показана перспективность оценки кинематической погрешности редуктора по измерениям вариаций текущего времени с одного датчика. Экспериментально установлено, что в вариациях временных интервалов содержится информация о нелинейных параметрических свойствах динамики редуктора.
13. Рассмотрены особенности обработки результатов измерения текущего периода вращения валопровода турбоагрегата. Предложен алгоритм оценки дисперсии флуктуаций внешнего момента на валу. Показано, что в спектре квадрата второй производной флуктуаций текущего периода содержится информация о вибрации датчиков информационно-измерительной хронометрической системы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Измерение периода вращения валопровода турбоагрегата фотоэлектрическим методом / М.И.Киселев, А.П.Козлов, А.Н.Морозов и др. // Измерительная техника. - 1996. - № 12. - С. 28-29.
2. Прецизионный хронометрический контроль работы машин и механизмов / М.И.Киселев, А.Н.Морозов, А.Л.Назолин и др. // Вопросы оптимального управления, устойчивости и прочности механических систем: Сб. науч. трудов Ереванского государственного университета. - Ереван, 1997. - С. 224-225.
3. Частотно-хронометрический контроль циклических машин и механизмов / М.И.Киселев, А.Н.Морозов, А.Л.Назолин и др. // Приборы и системы управления. - 1998. - № 3. - С. 33-34.
4. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Интегральная оценка информации, содержащейся в результатах измерения сигналов // Нелинейная акустика твердого тела: Сб. науч. трудов 8-й сессии Российского акустического общества. - Нижний Новгород, 1998. - С. 281-286.
5. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Математическое моделирование динамики спускового регулятора с несвободным ходом // Прикладная механика и технологии машиностроения: Сб. науч. трудов Нижегородского филиала института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН: В 2 т. - Нижний Новгород, 1998. - Т. 1. - С. 39-45.

6. Назолин А.Л. Измерительный контроль периода колебаний баланса часового механизма с несвободным ходом // Измерительная техника. – 1999. - № 2. – С. 29-31.
7. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Статистическое описание процесса хронометрии динамики механизмов циклического действия // Вестник МГТУ, Естественные науки. – 1999. - № 1. – С. 92-104.
8. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Павлов Д.А. Временные измерения кинематических и динамических параметров редукторов // Измерительная техника. – 1999. - № 4. – С. 58-60.
9. Назолин А.Л. Многофакторная математическая модель часового механизма с несвободным ходом // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 3-го Междун. сов.- сем. – М., 1994. – С. 34-35.
10. Назолин А.Л. Математическая оптимизация прецизионной регистрации момента прихода информационного импульса // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. 1-й науч.-техн. конф. – М., 1994. – С. 93-94.
11. Система измерительного контроля и диагностики циклических механизмов / С.Н.Горчаковский, О.А.Ивлев., М.И.Киселев и др. // Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники: Тез. докл. Междун. науч.-техн. конф. – Егорьевск, 1995. – С. 78-79.
12. Назолин А.Л. Исследование неравномерности хода часового механизма // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. 2-й науч.-техн. конф. – М., 1995. – С. 32-33.
13. Измерение периода вращения валопровода турбоагрегата оптико-электронным методом / М.И.Киселев, А.П.Козлов, А.Н.Морозов и др. // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. 2-й науч.-техн. конф. – М., 1995. – С. 100-101.
14. Результаты испытания системы хронометрического контроля динамики вращения валопровода турбоагрегата / О.А.Ивлев, М.И.Киселев, А.П.Козлов и др. // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 4-го Междун. сов.-сем. – М., 1996. – С. 12-13.
15. Назолин А.Л. Исследование динамики часового механизма частотно-хронометрическим методом // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 4-го Междун. сов.-сем. – М., 1996. – С. 14-15.
16. Прецизионный оптико-электронный измерительный контроль режима вращения валопровода турбогенератора / М.И.Киселев, А.П.Козлов, А.Н.Морозов и др. // Неразрушающий контроль и диагностика: Тез. докл. 14 Российской науч.-техн. конф. – М., 1996. – С. 422.
17. Прецизионный оптико-электронный измерительный контроль поведения валопровода турбоагрегата / М.И.Киселев, А.П.Козлов, А.Н.Морозов и др. // International Conference: Science and Engineering for Cities: Тез. докл. Междун. науч.-прак. конф. по использованию достижений науки и техники в развитии городов : В 2 т. – М., 1996. – Т. 1. – С. 250-252.

18. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Павлов Д.А. О возможности применения частотно-хронометрического метода для исследования динамики редукторов // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 10-летию НФ ИМАШ РАН. – Нижний Новгород, 1997. - С. 118.
19. Переходные процессы при пуске турбогенератора / М.И.Киселев, А.Н.Морозов, А.Л.Назолин и др. // Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники: Тез. докл. Междун. науч.-техн. конф. – Егорьевск, 1997. - С. 60-61.
20. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Павлов Д.А. Исследование динамики редукторов частотно-хронометрическим методом // Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники: Тез. докл. Междун. науч.-техн. конф. – Егорьевск, 1997. - С. 62-63.
21. Диагностика работы турбоагрегата / М.И.Киселев, А.Н.Морозов, А.Л.Назолин и др. // Достижения науки и техники - развитию города Красноярска: Тез. докл. науч.-прак. конф. – Красноярск, 1997. – С. 26-27.
22. Измерение кинематической погрешности зубчатых передач /М.И.Киселев, А.Н.Морозов, А.Л.Назолин и др. // Состояние и проблемы технических измерений.: Тез. докл. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. - М., 1997. - С. 18-19.
23. Кузиванов В.А., Мокин А.В., Назолин А.Л. Экспресс обработка измерительных данных вариометра // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. - М., 1997. - С. 161.
24. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Пронякин В.И. Влияние вибрации циклического механизма на частотно-хронометрические измерения // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 5-го Междун. сов.– сем. – М., 1998. - С. 32-33.
25. Оптимизация работы одноканального вариометра S-20Ц / А.Н.Морозов, А.В.Мокин, А.Л.Назолин и др. // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 5-го Междун. сов.– сем. – М., 1998. - С. 52-53.
26. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Интегральная оценка информации, содержащейся в случайном процессе // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тез. докл. 5-го Междун. сов.– сем. – М., 1998. - С. 200-201.
27. Морозов А.Н. Назолин А.Л. Исследование нелинейных колебаний баланса несвободного спускового регулятора // Нелинейные колебания механических систем: Тез. докл. 5-й Междун. конф., посвященной 275-летию РАН. – Нижний Новгород, 1999. – С.157.



Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

Заказ № 2. Подп. к печати 17.01.2000г. Тираж 100. Объем 1 печ. лист.