

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

УДК 519.711.3

Новик Наталья Владимировна.

Математическое моделирование хронометрического контроля работы 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, 1999

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Киселев М.И.
Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Назаров Н.Г.
кандидат физико-математических наук,
доцент Фалин А.И.
Ведущее предприятие: Нижегородский филиал института
машиноведения РАН

Защита диссертации состоится 11 января 2000 г. в 15.00 час. на
заседании диссертационного Совета Д 053.15.12 при Московском
государственном техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

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

Отзывы в двух экземплярах, зав'
адресу: 107005, Москва, 2-я Бау
Ученому секретарю диссертаци

по

Автореферат разослан « ____ » __

Ученый секретарь диссертацио.
Совета, д.ф.м.н., профессор

1565293

Заказ №
Объем 1,0 печатный лист.
Тираж 100 экз.

ООО Техполиграфцентр.
ПЛД № 53-477

Актуальность темы. Успехи современной физики в области квантовой механики, радиоэлектроники и оптики, прикладной математики и вычислительной техники обеспечили формирование предпосылок в приборостроении для создания нового поколения средств и методов измерительного контроля и диагностики машин и механизмов.

Актуальность этой проблемы возрастает в связи с тем, что в настоящее время сократился выпуск отечественной промышленной продукции и в хозяйстве страны эксплуатируется техника, испытывающая не только моральное старение, но и все больший физический износ.

Снижение ввода новых генерирующих мощностей ставит вопрос о поддержании работоспособности даже физически и морально устаревающих генераторов, что возможно только за счет расширенного применения диагностических методов.

В настоящее время наибольшее распространение в отечественной технике получили виброакустические средства и методы диагностики и контроля. Виброакустические контрольно-диагностические средства позволяют получать информацию в виде амплитудно-частотных или спектральных характеристик, отражающих техническое состояние диагностируемого объекта, однако устройства виброакустической техники не привязаны к эталонам с помощью государственных поверочных схем. Поэтому надежность и точность контроля деградации параметров технических объектов ограничены. Виброакустический сигнал, как правило, лишь косвенно характеризует движения объекта. Между полезным информационным и мешающим сигналами в реальных условиях возникают дополнительные взаимодействия. Существенным недостатком амплитудного метода является его малый динамический диапазон, определяемый собственными частотами вибродатчика.

Наряду с виброакустическим методом возник и развивается фазовый метод диагностики и контроля машин и механизмов. Он не имеет ограничений по частоте гармонических составляющих и основан на сравнении фаз последовательности электрических импульсов, в которые преобразуется движение конструктивных элементов исследуемых механизмов. Фазовый метод обладает и такими преимуществами, как отсутствие влияния на информационный сигнал вибрационных помех, вызываемых колебаниями на побочных степенях свободы, широкий частотный диапазон (от $1,5 \cdot 10^{-6}$ Гц до $1,5 \cdot 10^3$ Гц), возможность создания встроенных систем.

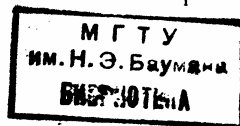
Особенно перспективны подобные подходы оказываются при изучении машин и механизмов циклического действия. Так, методически близкий к фазовому методу, хронометрический контроль осуществляется путем систематических измерений продолжительности каждого цикла, его целочисленно кратных долей или характерных интервалов.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1565293

Новик Н. В. Математическое



При этом информация о техническом состоянии объекта содержится в вариациях продолжительности измеренных временных интервалов и получается путем математической обработки результатов измерений.

Для исследования эффективности процесса хронометрического контроля и оптимизации параметров реализующей его информационно-измерительной системы необходимо математическое моделирование процесса получения последовательных временных отсчетов, отображающих функционирование объекта циклического действия.

Представленная диссертация посвящена разработке таких математических моделей циклических машин — двигателя внутреннего сгорания и турбогенератора, которые обеспечивают вычисление моментов временных отсчетов, соответствующих прохождению заданных контрольных точек цикла. С помощью построенных математических моделей выполнены расчеты, имитирующие хронометрический контроль изучаемых объектов в условиях возникновения различных дефектов и воздействий.

Целью диссертации является математическое моделирование процесса хронометрического контроля машин и механизмов циклического действия и поиск оптимальных вариантов его реализации.

Для осуществления данной цели решались следующие основные задачи.

1. Построение упрощенной математической модели двигателя внутреннего сгорания (ДВС), описывающей работу двигателя в хронометрическом представлении.
2. Построение упрощенной математической модели системы вал-турбина-генератор, описывающей работу системы в хронометрическом представлении.
3. Обратная некорректная задача о возможности выявления дефекта из хронограмм работающего ДВС.

- Научная новизна диссертации заключается в том, что
- обеспечено хронометрическое описание функционирования двигателя внутреннего сгорания и турбогенератора с помощью их математических моделей,
 - выполнено математическое моделирование хронометрического отклика на появление дефектов и внешних воздействий в функционирующих объектах,
 - показана эффективность представления хронометрической информации в виде полярных хронограмм цикла,
 - обоснована и предложена схема систематического хронометрического контроля технического состояния турбогенератора,
 - предложена схема регистрации длиннопериодных кратковременных крутильных колебаний валопровода турбогенератора

- обнаружена возможность систематического контроля изменения резонансных частот турбогенератора хронометрическим методом,
- показана возможность оперативного (за один цикл) выявления уменьшения объема впрыскиваемого топлива по полярным хронограммам цикла,
- показана возможность хронометрической регистрации крутильных колебаний коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что в ней:

- построены многофакторные математические модели двигателя внутреннего сгорания и турбогенератора, позволяющие численными расчетами имитировать хронометрический контроль объекта,
- установлены характерные признаки изменения исходных хронограмм и полярных хронограмм цикла, вызываемых появлением дефектов,
- обоснована возможность систематического прецизионного хронометрического контроля электрических параметров генератора турбоагрегата с использованием переходных режимов, создаваемых нестабильностью рабочих параметров,
- полученные результаты могут быть использованы при создании систем входного контроля турбогенераторов, а также при стендовой конструкторско-технологической обработки двигателя внутреннего сгорания.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на Третьем международном совещании «Инженерно-физические проблемы новой техники», Москва, МГТУ им.Баумана, 1994год, на первой научно-технической конференции «Состояние и проблемы технических измерений», МГТУ им.Баумана, 1994 год, на Международной научно-технической конференции «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники», Егорьевск, 1995 и 1997 год, на научно-технической конференции «Проблемы машиноведения», Нижней Новгород, 1997 год, , на Четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы технических измерений», МГТУ им. Баумана, 1997год, на научном семинаре Центра прикладной физики, на Пятом Международном совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники», 1998 год, на Пятой научно-технической конференции «Состояние и проблемы технических измерений» 1998 год.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего наименование работ отечественных и зарубежных авторов и приложений. Общий объем диссертации 108 страниц.

Содержание работы.

Во введении показана актуальность работы, сформулирована цель работы, а также задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

В первой главе описана упрощенная математическая модель ДВС в хронометрическом представлении.

Для моделирования работы ДВС выбран дезаксиальный кривошипно - шатунный механизм, содержащий 8 цилиндров. За основу принимается модель поршневой группы, состоящая из трех звеньев – вала, шатуна, цилиндра. Массы всех звеньев считаются сосредоточенными. Учитываются массы и моменты инерции звеньев, силы тяжести и силы трения.

Уравнения движения для всех звеньев поршневой группы образуют следующую систему уравнений (рис. 1):

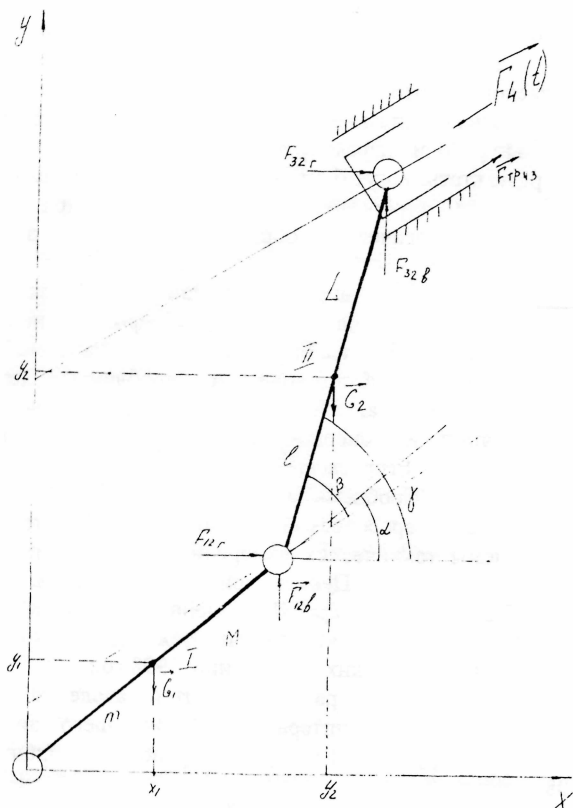


Рис.1. Кинематическая схема.

$$\left\{ \begin{aligned}
 m_3 \ddot{x}_3 &= F_{32h} - F_4 \sin \alpha - F(t) \cos \alpha - \frac{\dot{x}_3}{|\dot{x}_3|} F_4 ktr_3 \\
 m_3 \ddot{y}_3 &= F_{32v} - G_3 + F_4 \cos \alpha - F(t) \sin \alpha - \frac{\dot{y}_3}{|\dot{y}_3|} F_4 ktr_3 \\
 m_2 \ddot{y}_2 &= -F_{32v} - G_2 + F_{12v} \\
 m_2 \ddot{x}_2 &= -F_{32h} + F_{12h} \\
 I_2 \ddot{\gamma} &= -F_{32v} (L-l) \cos \gamma + F_{32h} (L-l) \sin \gamma - F_{12v} l \cos \gamma + \\
 &\quad + F_{12h} l \sin \gamma - M_{ш1} + M_{ш2} \\
 I_1 \ddot{\varphi} &= -F_{12v} s \cos \varphi + F_{12h} s \sin \varphi + M_{ш1} + M_v \\
 0 &= M_{ш2} + F_4 n + M_{опор}
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где F_{ij} - силы взаимодействия между звеньями (рис.1), $F(t)$ - сила давления газа в цилиндре, m_i - массы звеньев, $I_{1,2}$ - моменты инерции, $M_{шi}$ - момент трения в шарнирах, ktr - коэффициент трения.

В качестве примера рассмотрен четырехтактный двигатель. На рис.2 представлена индикаторная диаграмма двигателя, построенная в координатах давление - объем, характеризующая состояние газа.

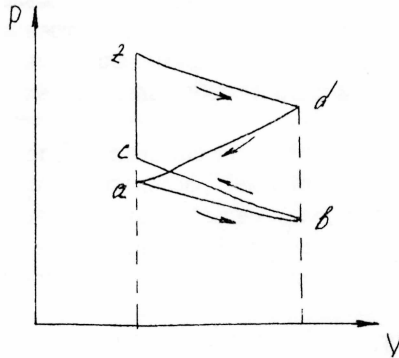


Рис.2. Индикаторная диаграмма двигателя.

Считая момент трения в шарнирах известной величиной, выразим все углы и координаты, а также их первые и вторые производные через угол

поворота вала φ и его первую и вторую производные . Получим следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{32h} + a_{00}F_4 + f_0\varphi = b_0 \\ -F_{32h} + F_{12h} + f_1\varphi = b_1 \\ a_{20}F_4 + F_{32v} + f_2\varphi = b_2 \\ -F_{32v} + F_{12v} + f_3\varphi = b_3 \\ a_{41}F_{32h} + a_{42}F_{32v} + a_{43}F_{21v} + a_{44}F_{21h} + f_4\varphi = b_4 \\ a_{53}F_{21v} + a_{54}F_{21h} + f_5\varphi = b_5 \end{array} \right. \quad (2)$$

Для описания движения вала требуется решить систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с заданными начальными условиями:

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi} &= f(\varphi, \dot{\varphi}, t), \\ \varphi(t_0) &= \varphi_0, \\ \dot{\varphi}(t_0) &= \dot{\varphi}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

т.е. решить задачу Коши.

Очевидно, что в отсутствии трения система будет линейной относительно вектора неизвестных параметров (F_{ij} и $\ddot{\varphi}$) и, следовательно, ее решение можно найти стандартными методами линейной алгебры.

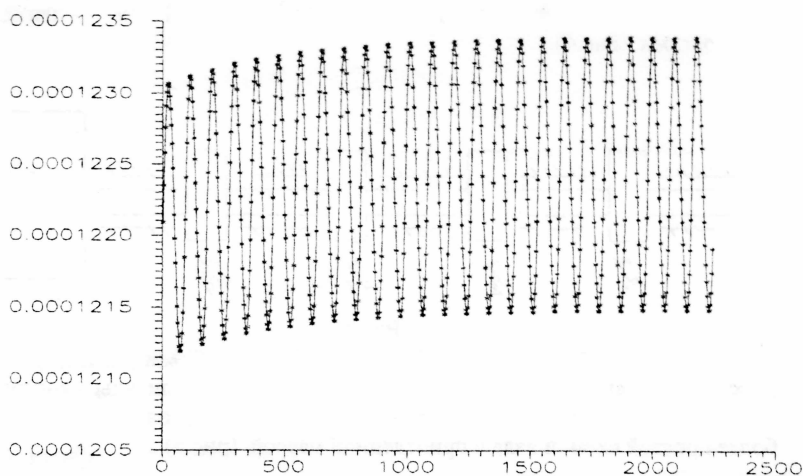
При наличии сил трения система нелинейна ($M = k(v) \cdot r \cdot N = k(v) \cdot r \cdot \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$) и прямое решение ее затруднительно. Для решения этой задачи использовался метод последовательных приближений. ДВС, содержащий восемь цилиндров, описывается соответственно системой из 41 уравнения, которая без учета сил трения будет линейной.

Для решения данной задачи применялись многошаговые методы с автоматическим выбором шага и требующие минимального числа расчетов функции.

Описанный алгоритм был реализован в программе на языке СИ. Математическая модель позволяет рассчитывать временные зависимости $\varphi(t)$, $\dot{\varphi}(t)$, $\ddot{\varphi}(t)$, рассчитывать силы в каждом звене в каждый момент времени, получать хронометрические зависимости. Исходными данными являются различные геометрические и динамические характеристики моделируемого двигателя.

На рисунке 3 приведен пример получаемых зависимостей. Интересно отметить, что полученные хронограммы с точностью до равномерного масштабного преобразования повторяют закон движения вала.

Интервал времени (с)



Угол (град)

Рис. 3.

С помощью описанной программы было выполнено моделирование ряда дефектов, рекомендованных для контроля работы ДВС ГОСТом 23435-79:

- запаздывания впрыска топлива в один из цилиндров;
- уменьшение массы впрыскиваемого топлива в одном из цилиндров;
- преждевременный впрыск топлива;
- опережение зажигания;
- движение коленчатого вала при отключении одного из цилиндров.

Во второй главе рассматривается работа турбогенератора в хронометрическом представлении. При нестационарном движении гибкого вала совместно с двигателем ограниченной мощности изменение угловой скорости происходит нелинейно. Угловая скорость вращения зависит от колебательного движения валопровода, т.к. система вал-турбина-генератор связана. Поэтому математическая модель должна описывать работу всех этих звеньев.

Описание движения системы вал-турбина-генератор требует учитывать изгибно - крутильные колебания вала и процессы в генераторе.

Математическая модель турбины представляется в приближении сосредоточенных параметров, где каждая ее ступень

рассматривается как массивный диск на валу в виде упругого невесомого стержня, обладающего крутильной и изгибной жесткостями (рис.4).

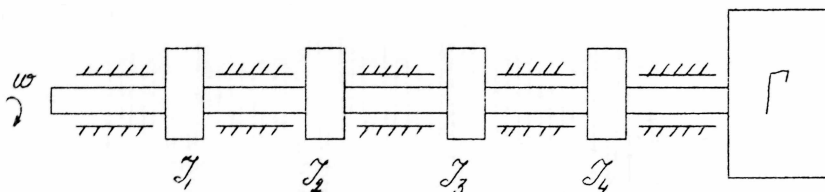


Рис.4.

В нестационарном режиме для вала с распределенной массой и для вала с массой, сосредоточенной на оси симметрии, амплитуды колебаний изменяются по одним и тем же законам. Поэтому можно ограничиться более простой схемой вала с приведенной массой (рис.5).

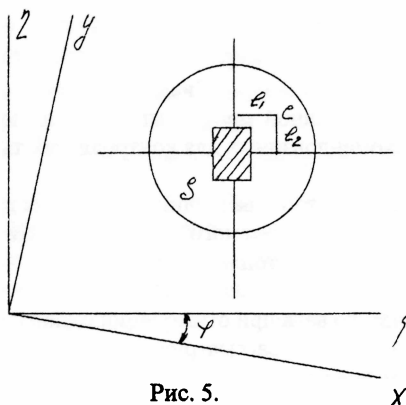


Рис. 5.

Изгибно-крутильные колебания отдельных ступеней турбогенератора описываются следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + r_1 \dot{\varphi}_1 + r_1'(\varphi_1 - \varphi_2) + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_1 e_1 (y_1 \cos \varphi_1 - x_1 \sin \varphi_1) = -m_1 g e_1 \cos \varphi_1 + M_1 \\ m_1 \ddot{x}_1 + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_{11}(\dot{x}_1 + \dot{\varphi}_1 y_1) + C_{11} x_1 = C_{11} e_1 \cos \varphi_1 \\ m_1 \ddot{y}_1 + \mu_1 \dot{y}_1 + \mu_{11}(\dot{y}_1 - \dot{\varphi}_1 x_1) + C_{12} y_1 = C_{12} e_1 \sin \varphi_1 - m_1 g \end{cases} \quad (4)$$

для турбины высокого давления;

$$\begin{cases} I_i \varphi_i + r_i \dot{\varphi}_i + r_i'(\varphi_i - \varphi_{i+1}) + c_{i-1,i}(\varphi_{i-1} - \varphi_i) + c_{i,i+1}(\varphi_i - \varphi_{i+1}) - c_i e_i (y_i \cos \varphi_i - x_i \sin \varphi_i) = \\ = -m_i g e_i \cos \varphi_i + M_i \\ m_i \ddot{x}_i + \mu_{i1} \dot{x}_i + \mu_{i2}(x_i + \varphi_i y_i) + C_{i,1} x_i = C_{i,1} e_i \cos \varphi_i \\ m_i \ddot{y}_i + \mu_i \dot{y}_i + \mu_{ii}(y_i - \varphi_i x_i) + C_{i,2} y_i = C_{i,2} e_i \sin \varphi_i - m_i g \end{cases} \quad (5)$$

— для первой и второй турбин среднего давления и турбины низкого давления (имеющих соответственно индексы $i=2,3,4$);

здесь

$$C_{i,1} = \frac{2c_i \cdot \tilde{c}_{i,1}}{c_i + 2\tilde{c}_{i,1}}; \quad C_{i,2} = \frac{2c_i \cdot \tilde{c}_{i,2}}{c_i + 2\tilde{c}_{i,2}};$$

Где:

μ_i, μ_{ii} — коэффициенты внешнего и внутреннего трения при изгибных колебаниях;

r_i' — коэффициент трения крутильных колебаний;

c_i — изгибная жесткость вала;

$\tilde{c}_{i,1}$ — коэффициент жесткости опоры i -той турбины в горизонтальном направлении;

$\tilde{c}_{i,2}$ — коэффициент жесткости опоры i -той турбины в вертикальном направлении;

$c_{i,i+1}$ — крутильная жесткость участка вала;

e_i, J_i, m_i — эксцентриситет, момент инерции и масса диска;

φ_i — угол закручивания i -го участка валопровода.

Решение ищется путем преобразования исходных уравнений в «укороченные» с помощью асимптотического метода:

$$\varphi_i = \omega t + \delta_i$$

$$x_i = x_{0i} + a_i \cos(\omega t + \alpha_i)$$

$$y_i = y_{0i} + b_i \sin(\omega t + \beta_i) \quad (6)$$

$$\dot{x}_i = -\omega a_i \sin(\omega t + \alpha_i)$$

$$\dot{y}_i = \omega b_i \cos(\omega t + \beta_i)$$

где a_i, b_i, δ_i — медленно изменяющиеся функции времени, x_{0i}, y_{0i} — постоянные величины.

Подстановка (6) в первое уравнение систем (4) и (5) и замены:

$$\hat{\beta}_i = \frac{r_i}{I_i}; \quad \hat{\beta}_i' = \frac{r_i'}{I_i}; \quad I_i = k_i m_i R_i^2; \quad \omega_{i,i+1}^2 = \frac{c_{i,i+1}}{I_i}; \quad \omega_i^2 = \frac{c_i}{m_i},$$

позволяют получить следующую систему уравнений для новых переменных:

$$\begin{aligned}
& \ddot{\delta}_1 + \hat{\beta}_1 \dot{\delta}_1 + \hat{\beta}_1'(\delta_1 - \dot{\delta}_2) + \omega_{12}^2(\delta_1 - \delta_2) + \frac{1}{2} \omega_1^2 \frac{e_1 a_1}{k_1 R_1^2} \sin(\delta_1 - \alpha_1) + \\
& \frac{1}{2} \omega_1^2 \frac{e_1 b_1}{k_1 R_1^2} \sin(\delta_1 - \beta_1) = 0 \\
& \ddot{\delta}_2 + \hat{\beta}_2 \dot{\delta}_2 + \hat{\beta}_2'(\delta_2 - \dot{\delta}_3) - \omega_{12}^2(\delta_1 - \delta_2) + \omega_{23}^2(\delta_2 - \delta_3) + \frac{1}{2} \omega_2^2 \frac{e_2 a_2}{k_2 R_2^2} \sin(\delta_2 - \alpha_2) + \\
& + \frac{1}{2} \omega_2^2 \frac{e_2 b_2}{k_2 R_2^2} \sin(\delta_2 - \beta_2) = 0 \\
& \ddot{\delta}_3 + \hat{\beta}_3 \dot{\delta}_3 + \hat{\beta}_3'(\delta_3 - \dot{\delta}_4) - \omega_{23}^2(\delta_2 - \delta_3) + \omega_{34}^2(\delta_3 - \delta_4) + \frac{1}{2} \omega_3^2 \frac{e_3 a_3}{k_3 R_3^2} \sin(\delta_3 - \alpha_3) + \\
& + \frac{1}{2} \omega_3^2 \frac{e_3 b_3}{k_3 R_3^2} \sin(\delta_3 - \beta_3) = 0 \\
& \ddot{\delta}_4 + \hat{\beta}_4 \dot{\delta}_4 + \hat{\beta}_4'(\delta_4 - \dot{\delta}_5) - \omega_{34}^2(\delta_3 - \delta_4) + \omega_{45}^2(\delta_4 - \delta_5) + \frac{1}{2} \omega_4^2 \frac{e_4 a_4}{k_4 R_4^2} \sin(\delta_4 - \alpha_4) + \\
& + \frac{1}{2} \omega_4^2 \frac{e_4 b_4}{k_4 R_4^2} c_4 e_4 b_4 \sin(\delta_4 - \beta_4) = 0
\end{aligned} \tag{7}$$

Второе и третье уравнения систем (4) и (5) при помощи асимптотического метода и замен: $\gamma_i = \frac{\mu_i}{m_i}$, $\gamma_{ii} = \frac{\mu_{ii}}{m_i}$ приводятся к виду:

$$\begin{cases}
-\dot{a}_i \omega - \frac{1}{2} a_i \omega (\gamma_i + \gamma_{ii}) + \frac{1}{2} \gamma_{ii} (\omega + \psi_i) b_i \sin(\alpha_i - \beta_i) = \frac{1}{2} \omega_i^2 e_i \sin(\alpha_i - \delta_i) \\
-\dot{a}_i a_i \omega + \frac{1}{2} a_i (\omega_i^2 - \omega^2) + \frac{1}{2} \gamma_{ii} (\omega + \psi_i) b_i \cos(\beta_i - \alpha_i) = \frac{1}{2} \omega_i^2 e_i \cos(\delta_i - \alpha_i) \\
-\dot{b}_i \omega - \frac{1}{2} b_i \omega (\gamma_i + \gamma_{ii}) + \frac{1}{2} \gamma_{ii} (\omega + \psi_i) a_i \sin(\alpha_i - \beta_i) = \frac{1}{2} \omega_i^2 e_i \sin(\alpha_i - \delta_i) \\
-\dot{b}_i b_i \omega + \frac{1}{2} b_i (\omega_i^2 - \omega^2) + \frac{1}{2} \gamma_{ii} (\omega + \psi_i) a_i \cos(\beta_i - \alpha_i) = \frac{1}{2} \omega_i^2 e_i \cos(\delta_i - \alpha_i)
\end{cases} \tag{8}$$

Работа турбогенератора описывается системой уравнений (7), (8) и электротехническими уравнениями (9).

$$\begin{aligned}
& I_5 \frac{\ddot{\delta}_5}{\omega_\delta} + (r_5 + \frac{E_q}{\omega^2 \omega_\delta}) \dot{\delta}_5 - c_{45}(\delta_4 - \delta_5) + \frac{1}{2} c_5 e_5 a_5 \sin(\delta_5 - \alpha_5) + \frac{I_q}{\omega} \Delta E_q - \\
& - \frac{1}{2} c_5 e_5 b_5 \sin(\delta_5 - \beta_5) - \frac{I_d}{\omega} \Delta E_d - \frac{x_d - x_q}{\omega} \Delta I_d - (\frac{E_q}{\omega} - \frac{x_d - x_q}{\omega} I_d) \Delta I_q = 0 \\
& \left(- \frac{2 E_q r x_d x_q}{z_{dq}^2} \frac{1}{\omega} - \frac{U (x_d \cos \theta_0 + r \sin \theta_0)}{z_{dq}^4} r (x_d - x_d') \frac{1}{\omega} + \frac{2 U \sin \theta_0}{z_{dq}^2} \frac{x_d}{\omega} - \right. \\
& \left. - 2 \frac{U (x_d \sin \theta_0 + r \cos \theta_0)}{z_{dq}^4} \frac{x_d x_q}{\omega} \right) \frac{1}{\omega_\delta} \frac{d}{dt} \delta_5 + \frac{x_q}{z_{dq}^2} \Delta E_d + \frac{r}{z_{dq}^2} \Delta E_q - \Delta I_q = 0
\end{aligned} \tag{9}$$

$$T_b \frac{d}{dt} \Delta E_q + \Delta E_q = \frac{E_q}{\omega \omega_s} T_b \frac{d^2}{dt^2} \delta_s + \frac{E_q}{\omega \omega_s} \frac{d}{dt} \delta_s + T_b (x_d - x'_d) \frac{d}{dt} \Delta I_d$$

$$\left(- \frac{E_q x_q (x_d x_q - r^2)}{z_{dq}^4} - \frac{U (x_q \sin \theta_0 - r \cos \theta_0)}{z_{dq}^4} r (x_d - x'_d) \frac{1}{\omega} - \frac{U \cos \theta_0}{z_{dq}^2} \frac{2 x_q}{\omega} + \right.$$

$$\left. + \frac{U (x_q \cos \theta_0 + r \sin \theta_0)}{z_{dq}^2} 2 x_d x_q \frac{1}{\omega} \right) \frac{1}{\omega} \frac{d \delta_s}{dt} + \frac{U (x_q \sin \theta_0 - r \cos \theta_0)}{z_{dq}} \delta_s -$$

$$\frac{x_q}{z_{dq}^2} \Delta E_q - \frac{r}{z_{dq}^2} \Delta E_d - \Delta I_d = 0$$

$$T_{\partial q} \frac{d}{dt} \Delta E_d + \Delta E_d = T_{\partial q} (x_q - x''_q) \frac{d}{dt} \Delta I_q$$

где E_d — ЭДС машины в продольной оси, возбуждаемая током в обмотке возбуждения;

E_q — ЭДС машины в поперечной оси;

r — активное сопротивление;

P — мощность;

I_d — проекция вектора полного тока I на продольную ось;

I_q — проекция вектора полного тока I на поперечную ось;

x_d — продольное сопротивление;

x''_d, x''_q — сверхпереходное продольное и поперечное сопротивление;

x_q — поперечное сопротивление;

U — напряжение на выходах машины;

Остальные величины находились из следующих выражений:

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{P(x_q - r \operatorname{tg} \varphi_s)}{U^2 + x_q P \operatorname{tg} \varphi_s + r P}$$

$$I_d = (\sin \theta_0 + \cos \theta_0 \operatorname{tg} \varphi_s) \frac{P}{U}; I_q = (\cos \theta_0 - \sin \theta_0 \operatorname{tg} \varphi_s) \frac{P}{U} \quad (10)$$

$$E_q = U \cos \theta_0 + x_d I_d + r I_d; E_d = 0$$

$$z_{dq}^2 = r^2 + x_d x_q$$

Уравнения (7) — (9) и начальные условия образуют задачу Коши для систем нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. При помощи введения дополнительного уравнения $\psi_i = \frac{d}{dt} \delta_i$ и замены $\frac{d^2}{dt^2} \delta_i = \frac{d}{dt} \psi_i$ данная задача сводится к системе нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Для решения использовался метод Рунге-Кутты.

Для реализации описанной математической модели турбогенератора написан пакет программ. Язык программирования — СИ. Разработанная и реализованная на ЭВМ программа позволила рассчитывать зависимость от

времени как механических, так и электрических параметров режима работы турбогенератора. Учет изгибных колебаний валопровода позволяет вычислить поперечные горизонтальные и вертикальные смещения каждой ступени турбины и генератора.

Получены хронограммы вращения различных ступеней турбины при начальном угле закручивания, при воздействии различных внешних моментов, при изменении механических и электрических параметров. Сравнение полученных графиков показывает, что также как и в первой главе, наблюдается геометрическое подобие закона движения вала и его хронограммы.

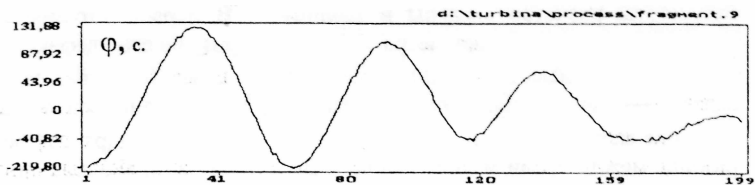
Значения параметров эквивалентных электрических контуров современных мощных промышленных генераторов в установившихся режимах отличаются от их значений в переходных режимах. Это различие обусловлено главным образом интенсивными динамическими эффектами, возникающими в столь энергонасыщенных электрических машинах.

Неопределённость информации об исходных электрических параметрах генератора снижает точность и достоверность математического моделирования работы турбогенератора в переходных режимах, а также оценки его технического состояния. Проведение же внезапных тестовых коротких замыканий при номинальном напряжении холостого хода для набора экспериментальных данных весьма нежелателен для машины, так как снижает её ресурс.

В данной работе показано, что постоянный хронометрический контроль вращения валопровода позволяет обнаружить временные интервалы, на которых имеются резкие скачки периодов, свидетельствующие о наличии малых, но конечных бросков параметров внешней нагрузки, и, следовательно, вращательного момента. Из-за малого времени воздействия возмущающего момента использование спектрального анализа не позволяет решить поставленную задачу.

Пример развернутой картины колебаний, полученной после математической обработки, приведен на рис.6. Определяемые здесь значения периода и декремента затухания кратковременных низкочастотных крутильных колебаний вала турбогенератора содержат информацию о его техническом состоянии и могут быть использованы для обеспечения систематического измерительного контроля.

В третьей главе рассматривается вопрос о наиболее информативном виде представления хронограмм в режиме непосредственного наблюдения. Также рассматривается и возможность диагностики двигателей внутреннего сгорания хронометрическим методом. Анализируется два возможных режима.



φ - угол отклонения вала от номинального положения.

Рис.6.

К первому относится диагностика дефектов, возникающих в момент снятия хронометрической зависимости. Получены характерные изменения хронограмм при возникновении некоторых дефектов.

Второй режим — без образцовой эталонной кривой, когда хронометрическая зависимость впервые снимается с двигателя, имеющего один или несколько дефектов в изделии. Эта задача является обратной некорректной.

В качестве признака, позволяющего выявить уменьшение массы впрыскиваемого топлива, была выбрана разница между максимальным значением функции скорости от времени для двигателя без дефекта и максимальным значением функции для двигателя с дефектом. При возникновении дефекта в рассматриваемом графике происходит уменьшение одного максимума в периоде.

Таблица 1.

Анализ влияния уровня шумов на выявление вытека топлива (Р – вероятность обнаружения дефекта)

χ вы тек	без шума			с шумом					
	Мах ускорения 10^3 град/с ²	Мах ускорения при дефекте 10^3 град/с ²	Δ 10^3 град/с ²	Шум	среднее значение пиков 10^3 град/с ²	среднее значение пиков с дефектом мс	Δ 10^3 град/с ²	σ 10^3 град/с ²	Р
0.95	259.91	198.66	61.25	0.0005	245	202	43	8	≈ 1
				0.001	240	206	34	14	0.984
				0.002	239	210	29	20	0.853
0.98	256.18	231.82	24.36	0.0005	270	236	34	8	≈ 1
				0.001	258	239	19	16	0.762

Результаты расчетов сведены в таблицу 1. В первом столбце таблицы приведена величина параметра χ , характеризующего дефект. Далее приведены данные полученные без влияния шума (обратная корректная задача) — значение максимума функции $\ddot{\varphi}(t)$ для цилиндров без дефекта, значение максимума функции для участка работы цилиндра с дефектом и разница между этими максимумами (δ). Во второй части таблицы приведены результаты решения некорректной обратной задачи (учитывается влияние шума).

Основные результаты и выводы.

1. Измерительная информация, получаемая в результате хронометрического контроля, выдается в виде временных рядов, которые являются достаточно глубоко изученным математическим объектом.
2. Создана упрощенная математическая модель двигателя внутреннего сгорания, описывающая динамику коленчатого вала и обеспечивающая получение временных рядов, содержащих информацию о его движении. За основу принята модель поршневой группы, состоящая из трех звеньев — вала, шатуна, цилиндра. Термодинамические процессы в цилиндре описываются в адиабатическом приближении. Разработан пакет программ, реализующий работу упрощенной математической модели ДВС на ЭВМ.
3. Разработана методика моделирования неравномерности вращения коленчатого вала внутри периода при изменении масс и моментов инерций звеньев, их геометрических параметров, эксцентриситета, а также таких дефектов в системе цилиндра, как: запаздывание и опережение впрыска топлива, уменьшение массы впрыскиваемого топлива, опережения зажигания, отключения одного из цилиндров.
4. Показана возможность диагностики крутильных колебаний коленчатого вала хронометрическим методом.
5. Введено понятие полярной хронограммы цикла и показана ее чувствительность к воздействиям: опережение зажигания, уменьшение массы впрыскиваемого топлива, запаздывание впрыска топлива.
6. Создана упрощенная математическая модель системы вал-турбина-генератор, позволяющая получать хронометрические зависимости — временные ряды, отображающие вращение валопровода турбогенератора с учетом изгибно - крутильных колебаний вала и электрических процессов в генераторе. Разработан пакет программ, реализующий работу системы вал-турбина-генератор на ЭВМ.
7. Промоделированы реакция системы и рассчитаны изменения хронограмм для следующих возмущений: наличие начального угла

закручивания соседних отрезков валопровода друг относительно друга, наличие постоянного нескомпенсированного момента в одной из турбин, одиночные и периодические возмущающие моменты с различными частотами на разных элементах системы.

8. В результате математического моделирования установлено, что экспериментально достигнутая точность хронометрирования режима вращения валопровода $\approx 10^{-7}$ с позволяет регистрировать его "отклик" на рассмотренные выше воздействия.
9. Предложен рациональный, отличный от традиционных, метод расчета амплитудно-частотных характеристик на основе хронометрической информации.
10. Установлено геометрическое подобие результатов обработки хронограмм и крутильных колебаний вала.
11. Показана возможность систематического контроля электрических параметров генератора турбоагрегата на основе хронограмм.
12. Выявлены характерные признаки изменения хронограмм зависимостей ДВС с момента возникновения следующих дефектов: опережение зажигания, уменьшение массы впрыскиваемого топлива, запаздывание впрыска топлива.
13. В результате анализа возможности безобразцовой диагностики ДВС установлено, что наиболее информативным параметром для выявления наличия дефекта является резкое изменение значения пика в функциональной зависимости скорости от времени.
14. Рассчитаны вероятности обнаружения уменьшения массы впрыскиваемого топлива по хронометрическим зависимостям при различных уровнях шума, т.е. решена обратная некорректная задача.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Новик Н.В. Математическая модель ДВС в хронометрическом представлении. // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тезисы докладов Третьего международного совещания. – М., 1994. – С.36-37.
2. Киселев М.И., Новик Н.В., Пронякин В.И. Применение частотно-хронометрического метода для контроля параметров турбоагрегата // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докладов первой всероссийской научно-технической конференции. – М., 1994. – С.131-132.
3. Новик Н.В. Киселев М.И. Пронякин В.И. О возможности хронометрического контроля двигателя внутреннего сгорания

- // Испытания материалов и конструкций. – Н.Новгород: Издательство общества «Интелсервис», 1996. - С. 255-261.
4. Система измерительного контроля и диагностики циклических механизмов / Н.В.Новик, М.И.Киселев, В.И.Пронякин и др. // Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники: Тезисы докладов международной научно-технической конференции.- Егорьевск, 1995. – С.78-79.
 5. Новик Н.В., Пронякин В.И. Определение спектра крутильных колебаний валопровода турбогенератора. // Проблемы машиноведения: Тезисы докладов всероссийской научно-технической конференции, посвященной 10-летию НФ ИМАШ РАН.- Н.Новгород: Интелсервис, 1997. - С. 122.
 6. Новик Н.В. Математическая модель турбогенератора в частотно-хронометрическом представлении // Измерительная техника. – 1998. - №4. -С.34-37.
 7. Киселев М.И., Новик М.И., Пронякин В.И. Пространственно временная развертка крутильных колебаний вращающегося вала на основе хронограмм // Состояние и проблемы технических измерений: Тезисы пятой всероссийской научно-технической конференции. – М., 1998.- С.99-100.
 8. Новик Н.В. Математическая модель и численный расчет вынужденных колебаний турбогенератора // Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники: Тезисы докладов второй международной научно-технической конференции ЕАТК ГА. - Егорьевск, 1997.- С.13.
 9. Киселев М.И., Новик М.И., Пронякин В.И. Электромеханические переходные процессы при включении турбогенератора под нагрузку // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тезисы докладов пятого международного совещания-семинара.- М., 1998.- С.30-31.
 10. Новик Н.В. Математическая модель ДВС в полярно-хронометрическом представлении // Состояние и проблемы технических измерений: Тезисы докладов Четвертой всероссийской научно-технической конференций. – М., 1997.- С.190.
 11. Новик Н.В. Изменения хронометрических зависимостей ДВС при запаздывании впрыска топлива // Инженерно-физические проблемы новой техники: Тезисы докладов пятого международного совещания – семинара. – М., 1998. - С.72-73.
 12. Новик Н.В. Анализ возможности хронометрического контроля ДВС на примере уменьшения массы впрыскиваемого топлива // Измерительная техника. – 1999. - №1.- С.34-35.

Подписано в печать

24. 11. 1999г.

Формат 60x84/16

Тираж 1 00 экз.

Заказ 318

Объем 1 л. л.

ООО «Техполиграфцентр» ПЛД № 53-477

Тел./факс: 151-26-70,

151-26-35