УДК 621.436.001: 621.314.12

Борисенко А.Н., д-р техн. наук; Кубрик Б.И.,канд. техн. наук; Лавриненко О.В., Ревуцкий В.И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ КЛАПАННОГО МЕХАНИЗМА ДВС НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Постановка проблемы.

Показатели работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) зависят от технического состояния его деталей и узлов таких, как топливная аппаратура, газовоздушный тракт, газораспределительный механизм, агрегаты наддува и т.д. [1]. Поэтому весьма важно поддерживать на должном уровне техническое состояние перечисленных узлов, что невозможно без средств диагностирования.

Анализ литературы [2–5] показывает, что при решении задач диагностирования ДВС преобладает детерминистический подход, который, как известно, не позволяет получить удовлетворительной достоверности технического состояния двигателя.

Цель статьи - определить основные диагностические признаки (информативные параметры) для оценки технического состояния клапанов газораспределительного механизма (ГРМ) с применением математического моделирования его вибраций на базе электромеханических аналогий в электрической цепи.

Основная часть.

В работе [6] были проанализированы виброакустические сигналы, сопровождающие работу впускных и выпускных клапанов ГРМ ДВС. Временные диаграммы этих сигналов схожи с кривыми изменения тока в активно-индуктивно-емкостной (*RLC*) цепи при колебательном переходном процессе. Поскольку клапанов в ГРМ может быть множество, то этот механизм в общем случае может рассматриваться как многовходовая колебательная система второго порядка, характеризующаяся определенным вектором импульсных переходных функций с составляющими:

$$\varphi_i(\tau)=\frac{\omega_i^2}{\psi_i}e^{-\beta_i\tau}\sin(\psi_i\tau)U(\tau),\; i=\overline{1,n}\;, \tag{1}$$

где $\psi_i=\sqrt{\omega_i^2-\beta_i^2}$; $\beta_i=\dfrac{R_i}{2L_i}>0$; $\omega_i=\dfrac{1}{\sqrt{L_iC_i}}$; $\omega_i>\beta_i$.

Отметим, что величина активного сопротивления R_i в электрической цепи соответствует силе трения в клапанном механизме, величина индуктивности L_i соответствует массе подвижных частей механизма, величина емкости C_i – размерам деталей механизма, величина тока в цепи соответствует $\varphi_i(\tau)$, а напряжение питания цепи $U(\tau)$.

Выбор функции вида (1) обусловлен тем, что *RLC*– контур в колебательном режиме имеет такую же характеристику, а также обладает удовлетворительным совпадением теоретических выводов с экспериментальными результатами моделирования. Для сохранения универсальности подхода остановимся на втором случае, так как он включает в качестве предельного и апериодический случай, потому что при этом импульсную переходную функцию можно получить как передел (1) при $\omega_i = \beta_i$ в виде

$$\lim_{\omega_i \to \beta_i} \varphi_i(\tau) = \lim_{\psi_i \to 0} \omega_i^2 \tau e^{-\beta_1 \tau} \frac{\sin \psi_i \tau}{\psi_i \tau} U(\tau) = \beta_i^2 \tau e^{-\beta_i \tau} U(\tau); \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \varphi_i(\tau) &= \frac{\omega_i^2}{i\tilde{\psi}_i} e^{-\beta_i \tau} \sin\left(i\tilde{\psi}_i \tau\right) U(\tau) = \frac{\omega_i}{\tilde{\psi}_i} e^{-\beta_i \tau} \operatorname{sh}\left(\tilde{\psi}_i \tau\right) U(\tau) = \\ &= \frac{\omega_i^2}{2\tilde{\psi}_i}\left[e^{-(\beta_i - \tilde{\psi}_i)\tau} - e^{-(\beta_i + \tilde{\psi}_i)\tau}\right] U(\tau). \end{aligned} \tag{3}$$

Вероятностный анализ предложенной математической модели выполнен в предположении, что на каждый из входов многовходовой системы, представленной вектором импульсных переходных функций (1) воздействует процесс , который можно рассматривать как аддитивное наложение большого числа независимых импульсов, возникающих в случайный момент времени. Такой воздействующий физический процесс в рамках сформулированных предположений можно описать моделями типа «белый шум». В общем случае компоненты (1) могут быть стационарно стохастически связанными. При этом каждая компонента–отклик, связанная с определенным каналом распространения, представляется в установившемся режиме в виде линейного процесса.

$$\xi_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i(t-\tau) d\eta_i(\tau), \; i = \overline{1,n}, \tag{4}$$

где каждая $\varphi_i(\tau), \tau \in (-\infty, \infty)$ определяется по (1) с учетом (2) для отдельных компонент, а $\left\{\eta_i(\tau), i = \overline{1,n}\right\}$ – вектор порождающих процессов с независимыми приращениями, производные компонент которого воздействуют на входы многовходовой системы. При этом предполагаем, что компоненты вектора порождающего процесса можно рассматривать как стохастически эквивалентные.

Таким образом, разбиение суммарного процесса вибраций в точке регистрации на слагаемые осуществляется в соответствии с резонансными свойствами каждого канала и колебательной системы клапанного механизма ГРМ в целом.

Корреляционная функция рассматриваемого процесса в установившемся режиме с учетом (4) может быть записана следующим образом:

$$R(s) = \sum_{k,i=1}^{n} a_k a_i h_{ki}(s), \; s \in (-\infty; \infty), \tag{5}$$

где $h_{ki}(s)$– взаимная корреляционная функция k–го *и* i–го каналов распространения.

Следовательно, из выражений (4,5) после интегрирования получим соотношение:

$$h_{ki}(|s|) = \frac{\kappa_{2ki}}{2} \frac{\omega_k^2 \omega_i^2}{\psi_k \psi_i} e^{-\beta_i |s|} \left[a_{ki} \cos \psi_i s + b_{ki} \sin \psi_i |s|\right], \tag{6}$$

где для всех $k, i = \overline{1,n}$, κ_{2ki} – смешанный второй семиинвариант случайных величин

$\eta_k(1)$ и $\eta_i(1)$, $\kappa_{2ki} = \kappa_2[\eta_k(1)\eta_i(1)]$, который при $k = i$ переходит в обычную дисперсию соответствующей случайной величины.

$$a_{ki} = \frac{\beta_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} - \frac{\beta_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} \geq 0;$$
$$b_{ki} = \frac{\tilde{\psi}_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} + \frac{\psi_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \psi_{ki}^2}; \tag{7}$$
$$\beta_{ki} = \beta_k + \beta_i; \psi_{ki} = \psi_k + \psi_i; \psi_{ki} = \psi_k - \psi_i .$$

Следует отметить, что при $\psi_i \to 0$ получим формулу

$$\lim_{\psi_i \to 0} h_{ki}(|s|) = \kappa_{2\mathrm{ki}} \frac{(\omega_k \beta_i)^2}{\beta_{ki}^2 + \psi_k^2} |s| e^{-\beta_i |s|} . \tag{8}$$

Таким образом, (5) с учетом (6) принимает вид

$$R(s) = \sum_{k,i=1}^{n} \frac{1}{2} a_k a_i \kappa_{2ki} \frac{(\omega_k \omega_i)^2}{\psi_k \psi_i} e^{-\beta_i |s|} \left[a_{ki} \cos\psi_i s + b_{ki} \sin\psi_i |s|\right], \tag{9}$$
$$s \in (-\infty, \infty).$$

Если ввести обозначения

$$A_{in} = \frac{a_i \omega_i^2}{2\psi_i} \sum_{k=1}^{n} \frac{a_k \omega_k^2 a_{ki}}{\psi_k} \kappa_{2ki} \geq 0;$$
$$B_{in} = \frac{a_i \omega_i^2}{2\psi_i} \sum_{k=1}^{n} \frac{a_k \omega_k^2 b_{ki}}{\psi_k} \kappa_{2ki}, \tag{10}$$

то корреляционную функцию вибропроцесса представим в виде

$$R(s) = \sum_{i=1}^{n} e^{-\beta_i |s|} \left[A_{in} \cos\psi_i s + B_{in} \sin\psi_i |s|\right], \tag{11}$$

при всех $s \in (-\infty, \infty)$.

В (11) все компоненты вектора $\psi_i, i = \overline{1,n}$, будем называть резонансными частотами, так как они определяют положение максимумов спектра, а компоненты вектора $\beta_i, i = \overline{1,n}$ – коэффициентами затухания.

При $s = 0$ из (11) получим дисперсию вибропроцесса в виде

$$R(0) = \sum_{i=1}^{n} A_{in} = \sum_{i,k=1}^{n} \frac{a_i a_k (\omega_i \omega_k)^2}{2\psi_i \psi_k} a_{ki} \kappa_{2ki} . \tag{12}$$

Выражение (11) можно представить в виде суммы экспоненциально-синусных компонент

$$R(s)=\sum_{i=1}^{n} e^{-\beta_i |s|} C_{in} \sin\left(\psi_i |s| + \Phi_{in}\right). \tag{13}$$

Таким образом автокорреляционная функция вибропроцесса ГРМ полностью определяется параметрами $a_i, \psi_i, \beta_i, i=\overline{1,n}$, которые можно использовать в качестве диагностических признаков при анализе вибраций клапанного механизма ГРМ в рамках корреляционной теории.

Вибропроцесс

$$\xi(t)=\sum_{i=1}^{n} a_i\, \xi_i(t) \tag{14}$$

является стационарным и гильбертовым $R(0)<\infty$, поэтому для него существует спектральная плотность, определяемая как косинус–преобразование Фурье с учетом (11) в виде

$$S(\omega)=2\sum_{i=1}^{n} \frac{A_{in}\beta_i\left(\omega_i^2+\omega^2\right)+B_{in}\psi_i\left(\omega_i^2-\omega^2\right)}{\left(\omega_i^2+\omega^2\right)^2-4\omega^2\psi_i^2}. \tag{15}$$

Остановимся на одномерной характеристической функции процесса (14). В предположении, что все компоненты вектора порождающего процесса стохастически эквивалентны, можно сразу записать общий вид ее логарифма

$$\begin{gathered}\ln f_\xi(u) = ium\sum_{i=1}^{n} a_{in} + \\ + \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\exp\left(iux\sum_{i=1}^{n} a_{in}\varphi_i(\tau)\right)-1-iux\sum_{i=1}^{n} a_{in}\varphi_i(\tau)\right]\frac{dK(x)}{x^2}\,d\tau.\end{gathered} \tag{16}$$

Полученное выражение (16) позволяет по известным характеристикам порождающего процесса с использованием преобразования Фурье–Стилтьеса вычислить значения функции распределения (14). Появление тех или иных дефектов ГРМ эквивалентно изменению значений параметров R_i, L_i, C_i в предложенной математической модели, что в свою очередь изменяет начальные и центральные моменты, а также характер кривой функции распределения вероятностей на основе (16).

Выводы.

Таким образом, для диагностики клапанного механизма ГРМ по его вибрациям можно использовать следующие диагностические признаки: коэффициент затухания $\beta_i, i=\overline{1,n}$; параметры $\psi_i, i=\overline{1,n}$; величины начальных и центральных моментов; характер кривой функции распределения вероятностей.

На основе проведенного вероятностного анализа модели вибрации клапанного механизма ГРМ и предложенных диагностических признаков разработан пакет программ для информационно-измерительной системы вибродиагностики.

***Литература:* 1**. *Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у*

6 т. Т. 1 : Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин : підручник / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов ; ред.: А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. – Харків : Прапор, 2004. – 384 с. **2**. *Яхьяев Н.Я. Основы теории надежности и диагностика / Н. Я. Яхьяев, А.В. Кораблин.-М.:Академия, 2009.-256с.* **3**. *Обозов А.А. Развитие методов и систем технического диагностирования ДВС / А.А. Обозов, В.И. Таричко // Двигателестроение. - 2012. - №4. С. 30-34.* **4**. *Сайданов В.О. Методика диагностирования двигателей внутреннего сгорания / Сайданов В.О., Столярчук Л.В., Асанов А.Ю. // Двигателестроение. - 2011. - №3. С. 26-30.* **5**. *Коллакот Р.А. Диагностирование механического оборудования / Р.А. Коллакот. - Л.: Судостроение, 1982. - 296 с.* **6**. *Лавриненко О.В. Определение информационных параметров для системы диагностики газораспределительного механизма ДВС, Вісник НТУ “ХПІ ”Інформатика та моделювання. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2014. – № 62. С 87 – 94.*

Bibliography (transliterated): **1**. *Marchenko A. P. Dviguni vnutrishnogo zgoryannya : seriya pidruchnikiv u 6 t. T. 1 : Rozrobka konstrukcij forsovanih dviguniv nazemnih transportnih mashin : pidruchnik / A. P. Marchenko, M. K. Ryazancev, A. F. Shehovcov ; red.: A. P. Marchenko, A. F. Shehovcov. – Harkiv : Prapor, 2004. – 384 p.* **2**. *Yahyaev N.Ya. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika / N. Ya. Yahyaev, A.V. Korablin.-M.:Akademiya, 2009.-256 p.* **3**. *Obozov A.A. Razvitie metodov i sistem tehnicheskogo diagnostirovaniya DVS / A.A. Obozov, V.I. Tarichko // Dvigatelestroenie. - 2012. - №4. pp. 30-34.* **4**. *Sajdanov V.O. Metodika diagnostirovaniya dvigatelej vnutrennego sgoraniya / Sajdanov V.O., Stolyarchuk L.V., Asanov A.Yu. // Dvigatelestroenie. - 2011. - №3. pp. 26-30.* **5**. *Kollakot R.A. Diagnostirovanie mehanicheskogo oborudovaniya / R.A. Kollakot. - L.: Sudostroenie, 1982. - 296 p.* **6**. *Lavrinenko O.V. Opredelenie informacionnyh parametrov dlya sistemy diagnostiki gazoraspredelitelnogo mehanizma DVS, Visnik NTU “HPI ”Informatika ta modelyuvannya. – Harkiv : NTU „HPI”, 2014. – № 62. pp. 87 – 94.*

Борисенко А.М., Кубрик Б.І., Лавриненко О.В., Ревуцький В.І.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ КЛАПАННОГО МЕХАНІЗМУ ДВЗ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АНАЛОГІЙ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ

У статті обґрунтовано вибір та визначення основних діагностичних ознак (інформативних параметрів) для оцінки технічного стану клапанів газорозподільного механізму (ГРМ) із застосуванням математичного моделювання його вібрацій на базі електромеханічних аналогій в електричному колі.

Борисенко А.Н., Кубрик Б.И., Лавриненко О.В., Ревуцкий В.И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ КЛАПАННОГО МЕХАНИЗМА ДВС НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

В статье обоснован выбор и определение основных диагностических признаков (информативных параметров) для оценки технического состояния клапанов газораспределительного механизма (ГРМ) с применением математического моделирования его вибраций на базе электромеханических аналогий в электрической цепи.

A. Borisenko, B. Kubrick, O. Lavrinenko, V. Revutskiy.

MATHEMATICAL MODELING OF VIBRATIONS OF VALVE GEAR OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE) BASED ON ELECTROMECHANICAL ANALOGIES OF THE PROCESSES IN THE ELECTRIC CIRCUIT

The article confirm the selection and determination of the main diagnostic features (informative parameters) for estimating the technical condition of valves of the gas distribution mechanism (GDM) using mathematical modeling of its vibrations based on electromechanical analogies in an electrical circuit.