

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ ДВИГУНА ВНУТРІШЬОГО ЗГОРЯННЯ

Єнікєєв О. Ф., Захаренков Д. Ю.

В качестве детерминированной математической модели кинематической схемы дизель-генератора предложена механическая система с десятью степенями свободы. Информационные связи между воздействиями цилиндров и сигналом флуктуаций скорости вращения первой массы устанавливает система интегро-дифференциальных уравнений. В результате математических преобразований получены передаточные функции, которые устанавливают связь между воздействиями отдельных цилиндров и сигналом измерительной информации. На основе частотного представления сигнала флуктуаций и крутящих моментов цилиндров разработана информационная технология оценивания идентичности рабочих циклов. В результате решения переопределенной системы алгебраических уравнений соответствующие аппаратные средства формируют программные изменения настроек процессов подачи топлива и воздуха в цилиндры дизель-генератора.

У якості детермінованої математичної моделі кінематичної схеми дизель-генератора запропоновано механічну систему із десятима ступенями волі. Інформаційні зв'язки між діями циліндрів та сигналом флуктуацій швидкості обертання першої маси встановлює система інтегро-диференціальних рівнянь. У результаті математичних перетворень отримано передатні функції, які встановлюють зв'язок між діями окремих циліндрів та сигналом вимірювальної інформації. На основі частотного подання сигналу флуктуації та крутних моментів циліндрів розроблено інформаційну технологію для оцінювання ідентичності робочих циклів. За результатами розв'язування перевизначеної системи алгебраїчних рівнянь відповідні апаратні засоби формують програмні зміни налаштувань процесів подачі палива та повітря в циліндри дизель-генератора.

As a deterministic mathematical model of the kinematic scheme of a diesel generator, a mechanical system with ten degrees of freedom is proposed. The system of integro-differential equations establishes the information relations between the actions of cylinders and the signal of the fluctuations of the rotational speed of the first mass. As a result of mathematical transformations received transfer functions that establish a connection between the actions of individual cylinders and the signal of measurement information. On the basis of the frequency representation of the signal of fluctuation and torque of cylinders, an information technology for assessing the identity of the working cycles has been developed. According to the results of the solution of a redefined system of algebraic equations, the corresponding hardware generates programmatic changes in the adjustment of the fuel and air supply processes to the cylinder of the diesel generator.

Єнікєєв О. Ф.

д-р техн. наук, доц., зав. каф. ІСПР ДДМА

Al_enikeev@bigmir.net

Захаренков Д. Ю.

пошукувач ДДМА

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 681.335.13

Єнікєєв О. Ф., Захарєнков Д. Ю.

**АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ ДВИГУНА ВНУТРІШЬОГО ЗГОРЯННЯ**

У якості джерел електропостачання на залізничному транспорті знайшли застосування дизель-генератори (ДГ). Штатне налаштування робочих циклів дизеля визначає його техніко-економічні показники [1]. Побудова апаратних засобів програмного задавання індивідуальних кутів подачі палива та повітря базується на використанні методу вимірювань індикаторних діаграм кожного циліндру та подальше порівняння з метою оцінювання їхньої ідентичності. Застосування ручної праці, велика кількість циліндрів та відсутність вихідних електричних сигналів у первинних перетворювачів тиску суттєво обмежують продуктивність відомого методу оцінювання. Пропонується ідея отримати кількісну оцінку ідентичності робочих циклів на основі цифрової обробки частотно-модульованого сигналу швидкості обертання колінчастого валу. За результатами оцінювання апаратні засоби формують програмні зміни налаштувань процесів подачі палива та повітря в циліндри дизеля з метою забезпечення ідентичності робочих циклів ДГ.

Метою даної роботи є розробка інформаційної технології оцінювання ідентичності робочих циклів ДГ на основі аналізу математичної моделі його кінематичної схеми.

Аналіз частотних характеристик математичної моделі кінематичної схеми багатоциліндрового ДГ. Розробка інформаційної технології оцінювання ідентичності робочих циклів.

При складанні детермінованої математичної моделі ДГ 10Д100 використаємо наступні припущення [2]:

- крутильну схему валопроводу ДГ подаємо у вигляді механічної системи, яка має десять ступенів волі (за кількістю циліндрів);
- не враховуємо тертя.

Рухи мас механічної системи, яка має десять ступенів волі, описуються наступною системою диференційних рівнянь [1]:

$$J_i \varphi_i''(t) - \frac{1}{e_{i+1,i}} [\varphi_{i+1}(t) - \varphi_i(t)] + \frac{1}{e_{i,i-1}} [\varphi_i(t) - \varphi_{i-1}(t)] = M_i(t), \quad (1)$$

де $i = 1, 2, 3, \dots, 10$; $\varphi_i(t)$ – кут закрутки i -тої маси; $M_i(t)$ – крутний момент, який діє в i -тому коліні валу, без урахування середнього значення; $e_{i+1,i}$ – податливість зв'язків між масами; J_i – момент інерції i -тої маси. Зубчасті передачі не ввійшли до складу математичної моделі, тому система диференційних рівнянь (1) є лінійною.

Сигнал флуктуацій швидкості обертання є похідною від кута закрутки. З урахування цього система диференційних рівнянь (1) набуває такого вигляду [3]:

$$J_i \Delta \omega_i'(t) - \frac{1}{e} \int [\Delta \omega_{i+1}(t) - \Delta \omega_i(t)] dt + \frac{1}{e} \int [\Delta \omega_i(t) - \Delta \omega_{i-1}(t)] dt = M_i(t). \quad (2)$$

Перетворення за Лапласом при нульових початкових умовах надає наступного вигляду системі інтегро-диференціальних рівнянь (2):

$$\Delta \omega_i(p) - \frac{1}{Jep^2 + 2} \Delta \omega_{i+1}(p) - \frac{1}{Jep^2 + 2} \Delta \omega_{i-1}(p) = \frac{ep}{Jep^2 + 2} M_i(p). \quad (3)$$

Після математичних перетворень система алгебраїчних рівнянь (3) приводиться до наступного вигляду:

$$\Delta \omega_1(p) = \sum_{i=1}^{10} \frac{\Delta_i}{\Delta} M_i(p), \quad (4)$$

де $\Delta \omega_1(p)$ – перетворення за Лапласом сигналу флуктуацій швидкості обертання першої маси дизеля;

$$\begin{aligned} \Delta &= 5d^8 - cd^9 + 10cd^7 - 20d^6 - 15cd^5 + 21d^4 + 7cd^3 - 8d^2 - cd + 1; \\ \Delta_1 &= a - 7ad^2 + 15ad^4 - 10bd^6 + ad^8 + ad^9 + bd^2 - 5bd^3 - 4bd^4 + 7bd^5 + 4bd^6 - 2bd^7 + bd \\ &\quad - acd + 6acd^3 - 10acd^5 + 4acd^7 - bcd^2 + bcd^3 + 4bcd^4 + 3bcd^5 - 4bcd^6 - 2bcd^7; \\ \Delta_2 &= b - 6ad^3 + 10ad^5 - 4ad^7 + ad^8 - 5bd^2 - 4bd^3 + 7bd^4 + 4bd^5 - 2bd^6 + ad + bd - bcd \\ &\quad - acd^2 + 5acd^4 - 6acd^6 + acd^8 - bcd^2 + 4bcd^3 + 3bcd^4 - 4bcd^5 - 2bcd^6; \\ \Delta_3 &= b + ad^2 - 5ad^4 + 6ad^6 + ad^7 - ad^8 - ad^9 - 5bd^2 - 9bd^3 + 8bd^4 + 11bd^5 - 4bd^6 - 3bd^7 \\ &\quad + 2bd - bcd - acd^3 + 4acd^5 - 3acd^7 - 2bcd^2 + 4bcd^3 + 7bcd^4 - 5bcd^5 - 6bcd^6 + 2bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_4 &= b + ad^3 - 4ad^5 + ad^6 + 3ad^7 - 2ad^8 - 4bd^2 - 9bd^3 + 4bd^4 + 12bd^5 - bd^6 - 5bd^7 + 2bd \\ &\quad - bcd - acd^4 + 3acd^6 - acd^8 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 7bcd^4 - 2bcd^5 - 6bcd^6 + bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_5 &= b + ad^4 + ad^5 - 3ad^6 - 3ad^7 + ad^8 + ad^9 - 4bd^2 - 8bd^3 + 4bd^4 + 8bd^5 - bd^6 \\ &\quad - 2bd^7 + 2bd - bcd - acd^5 + 2acd^7 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 6bcd^4 - bcd^5 - 3bcd^6 - bcd^7; \\ \Delta_6 &= b + ad^4 + ad^5 - 4ad^6 - 2ad^7 + 3ad^8 - 4bd^2 - 8bd^3 + 4bd^4 + 7bd^5 - bd^6 + 2bd - bcd \\ &\quad - acd^6 + acd^8 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 7bcd^4 - bcd^5 - 5bcd^6 - bcd^7; \\ \Delta_7 &= b + ad^3 - 5ad^5 + ad^6 + 6ad^7 - ad^8 - ad^9 - 4bd^2 - 9bd^3 + 3bd^4 + 11bd^5 + bd^6 \\ &\quad - 3bd^7 + 2bd - bcd - acd^7 - 2bcd^2 + 4bcd^3 + 8bcd^4 - 4bcd^5 - 8bcd^6 + bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_8 &= b + ad^2 - 6ad^4 + 10ad^6 + ad^7 - 4ad^8 - 5bd^2 - 10bd^3 + 7bd^4 + 14bd^5 - 2bd^6 - 5bd^7 \\ &\quad + 2bd - bcd - acd^8 - bcd^2 + 5bcd^3 + 4bcd^4 - 7bcd^5 - 4bcd^6 + 2bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_9 &= b - 7ad^3 + 15ad^5 - 10ad^7 + ad^8 + ad^9 - 6bd^2 - 5bd^3 + 11bd^4 + 7bd^5 - 6bd^6 - 2bd^7 \\ &\quad + ad + bd; \\ \Delta_{10} &= a - 8ad^2 + 21ad^4 - 20ad^6 + 5ad^8 + bc + bcd + acd^8 - 6bcd^2 - 5bcd^3 + 11bcd^4 + 7bcd^5 \\ &\quad - 6bcd^6 - 2bcd^7; \end{aligned}$$

$$a = \frac{ep}{Jep^2 + 1}, \quad b = \frac{ep}{Jep^2 + 2}, \quad c = \frac{1}{Jep^2 + 1}, \quad d = \frac{1}{Jep^2 + 2}.$$

Відношення визначників являє собою передатні функції, які встановлюють інформаційний зв'язок між крутними моментами окремих циліндрів та флуктуаціями швидкості обертання першої маси. Розрахунок логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАЧХ) виконано в середовищі Matlab. Результати розрахунків подано на рис. 1.

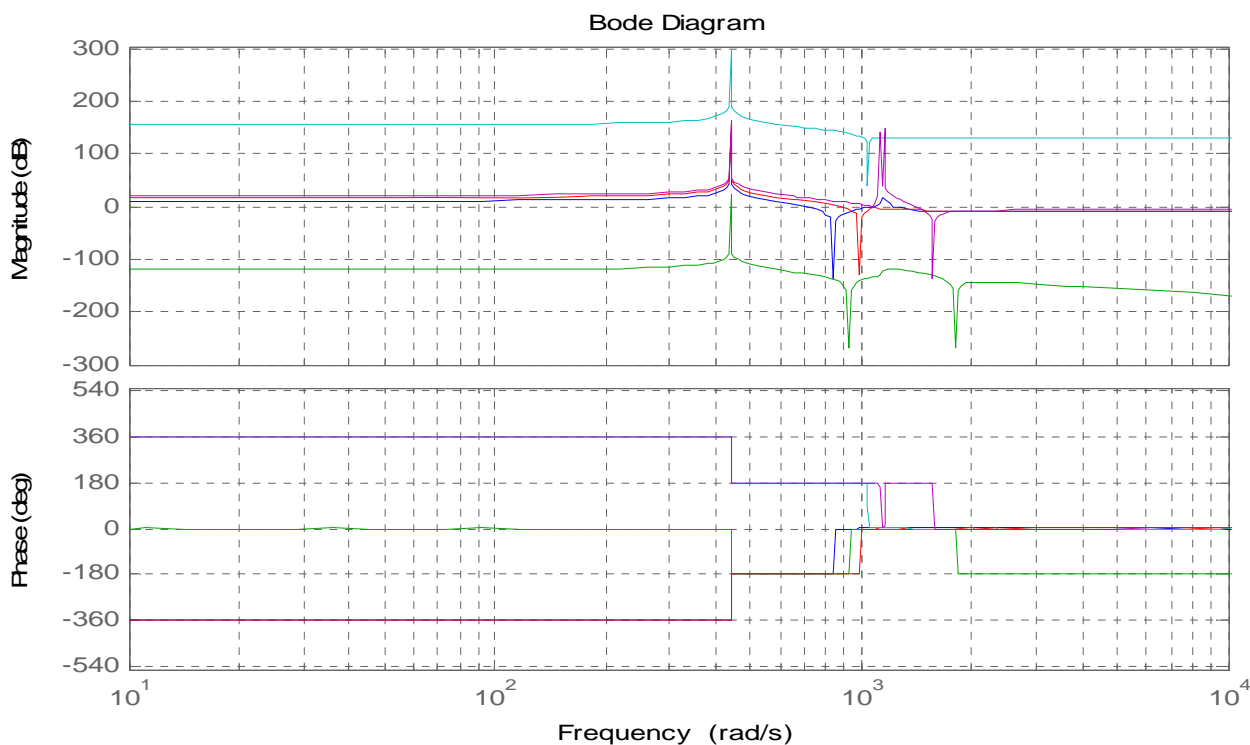


Рис. 1. ЛАЧХ передатних функцій W_1, \dots, W_5

Пошук нулів та полюсів передатних функцій дозволяє їх подати у вигляді послідовного з'єднання елементарних ланцюгів. При такому поданні передатної функції можливе спрощення математичної моделі за рахунок погашення коренів чисельника та знаменника, а також відкидання нестійких та коренів другого порядку малості.

Крутний момент, який утворює на колінчастому валу дизеля його циліндр, подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є. При такому поданні принципово можливо організувати зміни в налаштуванні процесів подачі палива та повітря в циліндр у вигляді амплітудного коефіцієнта D_i . Якщо значення D_i відрізняється від одиниці, то потрібно змінити налаштування процесів подачі палива та повітря у відповідний циліндр дизеля. Фазове запізнення процесів подачі палива та повітря до циліндрів дизеля відносно першого кратне 360° й розраховується із урахуванням наступної послідовності їхньої роботи: 1 – 6 – 10 – 2 – 4 – 9 – 5 – 3 – 7 – 8. Математично крутний момент описується таким рівнянням [4]:

$$M_i(t) = D_i \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\Omega t + \psi_k). \quad (5)$$

Ідентичність робочих циклів ДГ 10Д100 апаратні засоби оцінюють за величиною коефіцієнтів D_i , для визначення яких розв'язується система алгебраїчних рівнянь такого вигляду:

$$BD = \Delta \omega_1, \quad (6)$$

де B – матриця, коефіцієнти якої визначаються на основі ЛАЧХ передатних функцій трактів циліндр-колінчастий вал в залежності від обраного методу розрахунку; D – вектор-стовпець амплітудних коефіцієнтів; $\Delta \omega_1$ – вектор-стовпець часової реалізації сигналу флуктуацій першої маси. При його частотному поданні коефіцієнти матриці визначаються наступним чином:

$$B_{i,j} = \sum_{i=1}^{10} W_i(j\Omega) M_i(j\Omega). \quad (7)$$

Якщо частотне подання сигналу флуктуацій першої маси перевищує 10 гармонійних складових, то система алгебраїчних рівнянь (7) є перевизначеною. Тому для розрахунку оптимальних значень коефіцієнтів D_i можливо застосувати алгоритм мінімізації нев'язання. За результатами розрахунку апаратні засоби формують програмні зміни налаштувань процесів подачі палива та повітря в циліндри дизеля.

ВИСНОВКИ

Запропоновано механічну систему із десятьма ступенями волі у якості детермінованої математичної моделі дизель-генератора 10Д100. Отримано систему інтегро-диференційних рівнянь, яка описує інформаційний зв'язок між сигналом флуктуацій швидкості обертання першої маси та діями окремих циліндрів. Передатні функції, які встановлюють зв'язок між крутними моментами циліндрів та сигналом вимірювальної інформації, отримано у результаті математичних перетворень системи алгебраїчних рівнянь як відношення її визначників. На основі частотного подання сигналу флуктуацій розроблено інформаційну технологію оцінювання ідентичності робочих циклів. На основі використання алгоритму мінімізації нев'язання розв'язуємо перевизначену систему рівнянь та встановлюємо амплітудні коефіцієнти циліндрів, на підставі яких виконіємо програмні налаштування процесів подачі палива та повітря.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Истомин П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС / П. А. Истомин. – Л. : Судостроение, 1968. – 304 с.
2. Анализ работы ДВС по флуктуации частоты вращения коленчатого вала / А. Н. Борисенко, А. Ф. Еникеев, Е. Г. Заславский, Г. Я. Невяжский, В. Н. Соболев // Двигателестроение. – 1988. – № 8. – С. 22–25.
3. Оценка рабочих циклов ДВС по скорости вращения вала / Ф. М. Евсюкова, О. В. Евсюкова, А. Ф. Еникеев, И. С. Зыков // Вестник Харьковского государственного политехнического института. – 1999. – № 58. – С. 40–42.
4. Диагностирование дизель-генератора по девиации частоты вращения вала / А. Н. Борисенко, А. Ф. Еникеев, В. П. Самсонов, Г. М. Киселева // Измерительная техника. – 1988. – № 9. – С. 24–26.

Стаття надійшла до редакції 09.10.2017 р.