

УДК 681.335.13

Є. А. Борисенко, О. Ф. Єнікєєв

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ІДЕНТИЧНОСТІ РОБОЧИХ ЦИКЛІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Національний технічний університет «ХПІ», Український державний університет залізничного транспорту, Харків

Анотація. Запропоновано метод оцінювання ідентичності робочих циклів двигунів внутрішнього згоряння на основі обробки сигналу девіацій швидкості обертання колінчастого вала. Запропоновано механічну систему з десятьма ступенями волі у якості математичної моделі багатоциліндрового двигуна. Отримано передатні функції впливів циліндрів на сигнал девіацій швидкості обертання першої маси. Запропоновано метод та апаратні засоби компенсації кінематичної похибки первинного перетворювача миттєвої швидкості обертання колінчастого вала. Розроблено інформаційну технологію цифрової обробки сигналу швидкості та оцінювання ідентичності робочих циклів.

Ключові слова: девіації, інформаційна технологія, передатна функція, метод підвищення точності.

Аннотация. Предложен метод оценивания идентичности рабочих циклов двигателей внутреннего сгорания на основе обработки сигнала скорости вращения коленчатого вала. Предложена механическая система с десятью степенями свободы в качестве математической модели многоцилиндрового двигателя. Получены передаточные функции вкладов цилиндров в сигнал девиаций скорости вращения первой массы. Предложен метод и аппаратные средства для компенсации кинематической погрешности первичного преобразователя мгновенной скорости вращения коленчатого вала. Разработана информационная технология цифровой обработки сигнала скорости и оценивания идентичности рабочих циклов.

Ключевые слова: девиации, информационная технология, передаточная функция, метод повышения точности.

Abstract. Method for identity estimation of internal combustion engines duty cycles based on signal of crankshaft rotational speed deviation processing is proposed. Mechanical system with 10 degrees of freedom as a mathematical model of multi cylinder engine is proposed. A transfer function of cylinders' contribution to the rotational speed deviation of the first mass is obtained. Method and apparatus for compensation of kinematic error of the instantaneous crankshaft rotation speed sensor is proposed. Informational technology for digital processing of signal of speed and duty cycles identity estimation is developed.

Key words: deviations, informational technology, transfer function, method of increase of accuracy.

Вступ

Техніко-економічні показники двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) залежать від ідентичності робочих циклів. Основним лабораторним методом оцінювання цього показника ДВЗ є вимірювання та порівняння індикаторних діаграм. Відомі первинні перетворювачі, які використовуються для вимірювань індикаторних діаграм, не мають вихідних електричних сигналів, що визначає малу продуктивність методу оцінювання. Авторами пропонується ідея використання сигналу девіацій швидкості обертання колінчастого вала у якості вхідної інформації для отримання кількісної оцінки ідентичності робочих циклів ДВЗ. Програмні впливи на процес паливоподачі в окремі циліндри розраховуються інформаційно-вимірювальною системою (ІВС) на основі обробки сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала. Зміна налаштувань процесу паливоподачі забезпечує ідентичність робочих циклів та покращує техніко-економічні та екологічні показники ДВЗ [1].

Актуальність

Відсутність ефективних апаратних засобів для вимірювань інформаційного сигналу, алгоритмічного та прикладного програмного забезпечення.

Мета

Покращення точності та продуктивності процесу оцінювання ідентичності робочих циклів ДВЗ на основі вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала.

Задачі досліджень

1. Розробка математичної моделі кінематичної схеми багатоциліндрового ДВЗ.
2. Аналіз вихідного сигналу моделі та реалізація інформаційно-вимірювального пристрою.
3. Розробка прикладного програмного забезпечення.

Розв'язання задач

При складанні математичної моделі дизель-генератора 10Д100 використаємо наступні припущення:

- крутильну схему валопроводу дизеля 10Д100 подаємо у вигляді механічної системи, яка має десять ступенів волі;

© Є. А. Борисенко, О. Ф. Єнікєєв, 2016

- не враховуємо тертя.

Рухи мас механічної системи, яка має десять ступенів волі, описуються наступною системою диференціальних 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 J_i – момент інерції i -тої маси; $\varphi_i(t)$ – кут закрутки i -тої маси; $M_i(t)$ – крутний момент, який діє в i -тому коліні вала, без урахування середнього значення; $e_{i+1,i}$ – податливість зв'язків між $(i+1)$ -шою та i -тою масами. Джерела нелінійності (зубчасті передачі) не ввійшли до складу математичної моделі, тому система рівнянь є лінійною.

Сигнал дев'яти швидкості обертання колінчастого вала ДВЗ зв'яже з кутом закрутки наступний вираз

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (2)$$

З урахування цього система диференціальних рівнянь (1) набуває такого вигляду

$$J_i \Delta\omega_i'(t) - \frac{1}{e} \int [\Delta\omega_{i+1}(t) - \Delta\omega_i(t)] dt + \frac{1}{e} \int [\Delta\omega_i(t) - \Delta\omega_{i-1}(t)] dt = M_i(t). \quad (3)$$

Перетворення за Лапласом системи рівнянь (3) при нульових початкових умовах надає їй наступного вигляду

$$\Delta\omega_i(p) - \frac{1}{Jep^2 + 2} \Delta\omega_{i+1}(p) - \frac{1}{Jep^2 + 2} \Delta\omega_{i-1}(p) = \frac{ep}{Jep^2 + 2} M_i(p). \quad (4)$$

У результаті математичних перетворень система алгебраїчних рівнянь (4) приводиться до наступного вигляду

$$\Delta\omega_1(p) = \sum_{i=1}^{10} \frac{\Delta_i}{\Delta} M_i(p), \quad (5)$$

де $\Delta = 5d^8 - cd^9 + 10cd^7 - 20d^6 - 15cd^5 + 21d^4 + 7cd^3 - 8d^2 - cd + 1$;

$\Delta_1 = a - 7ad^2 + 15ad^4 - 10bd^6 + ad^8 + ad^9 + bd^2 - 5bd^3 - 4bd^4 + 7bd^5 + 4bd^6 - 2bd^7 + bd - acd + 6acd^3 - 10acd^5 + 4acd^7 - bcd^2 + bcd^3 + 4bcd^4 + 3bcd^5 - 4bcd^6 - 2bcd^7$;

$\Delta_2 = b - 6ad^3 + 10ad^5 - 4ad^7 + ad^8 - 5bd^2 - 4bd^3 + 7bd^4 + 4bd^5 - 2bd^6 + ad + bd - bcd - acd^2 + 5acd^4 - 6acd^6 + acd^8 - bcd^2 + 4bcd^3 + 3bcd^4 - 4bcd^5 - 2bcd^6$;

$\Delta_3 = b + ad^2 - 5ad^4 + 6ad^6 + ad^7 - ad^8 - ad^9 - 5bd^2 - 9bd^3 + 8bd^4 + 11bd^5 - 4bd^6 - 3bd^7 + 2bd - bcd - acd^3 + 4acd^5 - 3acd^7 - 2bcd^2 + 4bcd^3 + 7bcd^4 - 5bcd^5 - 6bcd^6 + 2bcd^7 + bcd^8$;

$\Delta_4 = b + ad^3 - 4ad^5 + ad^6 + 3ad^7 - 2ad^8 - 4bd^2 - 9bd^3 + 4bd^4 + 12bd^5 - bd^6 - 5bd^7 + 2bd - bcd - acd^4 + 3acd^6 - acd^8 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 7bcd^4 - 2bcd^5 - 6bcd^6 + bcd^7 + bcd^8$;

$$\begin{aligned} \Delta_5 &= b + ad^4 + ad^5 - 3ad^6 - 3ad^7 + ad^8 + ad^9 - 4bd^2 - 8bd^3 + 4bd^4 + 8bd^5 - bd^6 - 2bd^7 \\ &+ 2bd - bcd - acd^5 + 2acd^7 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 6bcd^4 - bcd^5 - 3bcd^6 - bcd^7; \\ \Delta_6 &= b + ad^4 + ad^5 - 4ad^6 - 2ad^7 + 3ad^8 - 4bd^2 - 8bd^3 + 4bd^4 + 7bd^5 - bd^6 + 2bd - bcd \\ &- acd^6 + acd^8 - 2bcd^2 + 3bcd^3 + 7bcd^4 - bcd^5 - 5bcd^6 - bcd^7; \\ \Delta_7 &= b + ad^3 - 5ad^5 + ad^6 + 6ad^7 - ad^8 - ad^9 - 4bd^2 - 9bd^3 + 3bd^4 + 11bd^5 + bd^6 - 3bd^7 \\ &+ 2bd - bcd - acd^7 - 2bcd^2 + 4bcd^3 + 8bcd^4 - 4bcd^5 - 8bcd^6 + bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_8 &= b + ad^2 - 6ad^4 + 10ad^6 + ad^7 - 4ad^8 - 5bd^2 - 10bd^3 + 7bd^4 + 14bd^5 - 2bd^6 - 5bd^7 + 2bd \\ &- bcd - acd^8 - bcd^2 + 5bcd^3 + 4bcd^4 - 7bcd^5 - 4bcd^6 + 2bcd^7 + bcd^8; \\ \Delta_9 &= b - 7ad^3 + 15ad^5 - 10ad^7 + ad^8 + ad^9 - 6bd^2 - 5bd^3 + 11bd^4 + 7bd^5 - 6bd^6 - 2bd^7 \\ &+ ad + bd; \\ \Delta_{10} &= a - 8ad^2 + 21ad^4 - 20ad^6 + 5ad^8 + bc + bcd + acd^8 - 6bcd^2 - 5bcd^3 + 11bcd^4 + 7bcd^5 \\ &- 6bcd^6 - 2bcd^7; \\ a &= \frac{ep}{Jep^2 + 1}, \quad b = \frac{ep}{Jep^2 + 2}, \quad c = \frac{1}{Jep^2 + 1}, \quad d = \frac{1}{Jep^2 + 2}. \end{aligned}$$

Відношення визначників задає вирази для передатних функцій, які встановлюють зв'язок між крутними моментами циліндрів ДВЗ та девіаціями швидкості обертання першої маси. Розрахунок логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАЧХ) виконано в середовищі Matlab. Результати розрахунків подано на рис. 1.

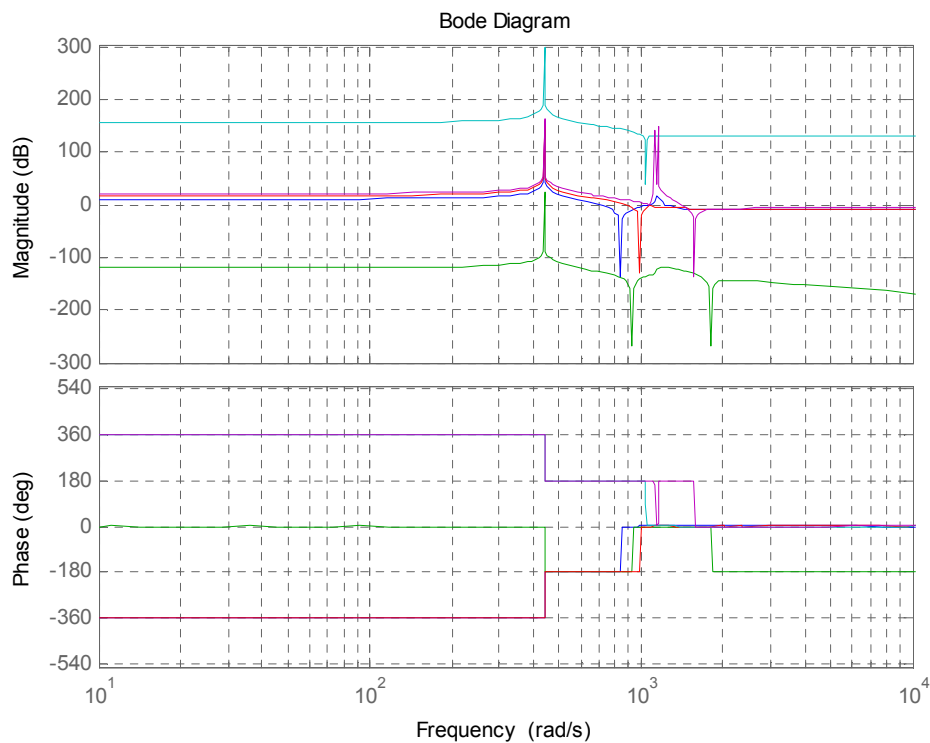


Рисунок 1 – ЛАЧХ передатних функцій W_1, \dots, W_5

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

Крутний момент, який утворює на колінчастому валу ДВЗ окремий циліндр, подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є. При такому поданні принципово можливо організувати зміни в налаштуванні подачі палива до окремого циліндру у вигляді амплітудного коефіцієнта D_i , який визначає відхилення від штатного налаштування дизеля 10Д100. Фазове запізнення процесу подачі палива до окремого циліндра відносно першого визначається з урахуванням їхньої послідовності роботи: 1 – 6 – 10 – 2 – 4 – 9 – 5 – 3 – 7 – 8. Математично крутний момент описується таким рівнянням

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

Комп'ютерним моделюванням отримано графіки девіацій миттєвої швидкості обертання першої маси в межах одного оберту колінчастого вала при різноманітних налаштуваннях ДВЗ (рис. 2). Відключення подачі палива до першого циліндра забезпечується при $D_1 = 0$, до другого – при $D_2 = 0$.

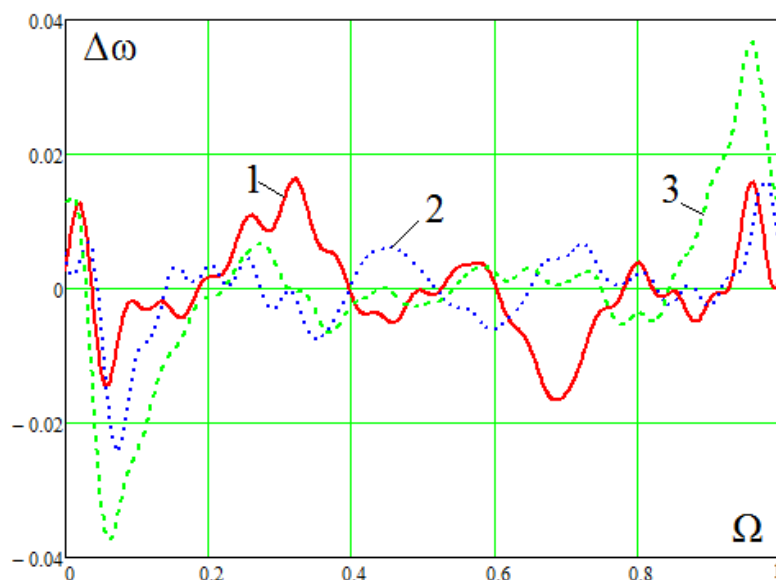


Рисунок 2 – Сигнал девіацій швидкості обертання першої маси:
1 – штатне налаштування, 2 – паливо не подається до першого циліндра,
3 – паливо не подається до другого циліндра

З аналізу графіків встановлено, що амплітудне значення девіацій не перевищує 0.05 миттєвої швидкості обертання колінчастого вала ДВЗ. Часову реалізацію девіацій визначаємо в результаті цифрової обробки частотно-модульованого сигналу з малою глибиною модуляції. Ця процедура достатньо складна та потребує розробки апаратних засобів, які мають малий інтервал невизначеності навколо номінальної характеристики перетворення.

Розробку інформаційно-вимірювального пристрою почнемо з аналізу складових похибки первинного перетворювача (ПП):

- похибка відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками, яка визначається для його частотного подання за допомогою виразу

$$\delta_{\dot{a}} = \frac{t_0}{8} \sqrt{0.1 \sum_{i=1}^{10} \Omega_i^4} 100\%; \quad (6)$$

- кінематична похибка ПП, яку визначено на прикладі дослідження допусків на виготовлення зубчастих коліс різного класу точності та подано в табл. 1. При оцінюванні кінематичної похибки засто-

совано такий вираз

$$\delta_6 = \frac{\Delta m}{m} 100\%, \quad (7)$$

де Δm – допуск на кінематичну похибку зубчастого колеса, m – модуль;

- динамічна похибка ПП полягає у зрушеннях за часом дискретних відліків часової реалізації сигналу девіацій, які виникають як наслідок наявності кінематичної.

Таблиця 1 – Чисельні дані кінематичної похибки

Клас точності зубчастого колеса	4	5	6	7	8
$\delta_k, \%$	0.80	1.25	2.00	2.75	4.00
Похибка вимірювань девіацій, %	16.0	25.0	40.0	55.0	80.0

Дані табл. 1 дозволяють зробити висновок: вимірювання сигналу девіацій потребують розробки методу зменшення величини кінематичної похибки ПП та відповідних апаратних засобів. Одним із можливих шляхів розв'язування цієї задачі є виконання паспортизації первинного перетворювача. У результаті паспортизації отримаємо поправки, які враховує вимірювальний перетворювач при визначенні сигналу девіацій. До складу перетворювача також входить пристрій синхронізації з фазою обертання ПП.

Для компенсації кінематичної похибки автори пропонують метод багатоканальних вимірювань інтервалів часу, які формуються одною рисою ПП та відповідають повному оберту його вала. При такому методі вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання кінематична похибка не впливає на тривалість сформованих інтервалів часу. Однак виникає динамічна похибка зрушень за часом дискретних відліків часової реалізації сигналу девіацій, які виникають як наслідок кінематичної. Виконано оцінювання динамічної похибки ПП. Її абсолютне значення знаходимо таким чином

$$\Delta_{\ddot{a}i} = \frac{1}{\dot{O}} \int_0^{\dot{O}} [\Delta\omega(\Omega t + \Omega\sigma_{\zeta i}) - \Delta\omega(\Omega t)] dt, \quad (8)$$

де $\sigma_{\zeta i}$ – середнє квадратичне відхилення часового зсуву дискретних відліків, яке визначено на підставі допусків ПП.

Для гармонійного сигналу останній вираз після математичних перетворень набуває такого вигляду

$$\Delta_{\ddot{a}i, i} = \frac{2A_i}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{\zeta i}) \sin(i\Omega\sigma_{\zeta i}). \quad (9)$$

Відносно похибку гармонійного сигналу отримано в такому вигляді

$$\delta_i = \frac{2}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{\zeta i}) \sin(i\Omega\sigma_{\zeta i}). \quad (10)$$

Динамічну похибку ПП визначаємо з урахуванням внесків гармонійних складових до сигналу девіацій

$$\delta_{\ddot{a}i} = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (A_i \delta_i)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^{10} A_i^2}. \quad (11)$$

Результати розрахунків динамічної похибки ПП подано в табл. 2. Ефективність методу вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала ДВЗ, який запропоновано, встановлюється при порівнянні даних табл. 1 та 2.

Таблиця 2 – Чисельні дані динамічної похибки

Клас точності первинного перетворювача	4	5	6	7	8
Похибка вимірювань девіацій, %	3.1	4.8	7.4	9.9	14.1

Сутність методу апаратної компенсації кінематичної похибки ПП полягає в тому, що вихідний сигнал блоку ДЗ за допомогою лічильника та дешифратора перетворюється в декілька імпульсних послідовностей. Положення імпульсів у них відповідає моментам проходження біля чутливого елемента датчика однієї риски. Цей сигнал подається на вхід відповідного каналу для вимірювань інтервалів часу. Кількість каналів у складі пристрою визначається кількістю рисок ПП. Апаратну реалізацію каналів для вимірювань проведено на основі методу дискретизації за часом. Усунення взаємних накладань вихідних сигналів каналів при їхньому поєднанні схемою АБО у сигнал вимірювальної інформації для пристрою 5 виконується за допомогою лічильників. Об'єм останніх та частота взірцевого генератора обираються таким чином, щоб переповнення лічильника виконувалося за час трохи менший, ніж середній період імпульсної послідовності. При цьому з вимірювальної інформації кожного каналу виключається калібрований за тривалістю проміжок часу.

На підставі цього методу розроблено оригінальний пристрій для вимірювань сигналу девіацій (рис. 3), який описано в роботі [3]. На рисунку позначено: ТА1, ..., ТА4 – логічні схеми ТА; Г – взірцевий генератор; ДШ – дешифратор; Т1, ..., Т3 – тригери; АБО1, АБО2 – логічні схеми АБО; Л1, ..., N – кількість каналів для вимірювань; Л1, ..., Л4 – лічильники імпульсів; Ф – формувач імпульсів; N_x – вихідний код; З – лінія затримки. Пристрій для вимірювань має два канали, які вимірюють тривалість імпульсів прямого та інверсного виходів Т1. Сигнал вимірювальної інформації для пристрою 5 формує схема АБО2. Лічильник Л3 перетворює цей сигнал у цифровий код. Блок Ф формує сигнал запису коду в регістр пристрою 5 та за допомогою блоку З переводить лічильник Л3 до нульового стану.

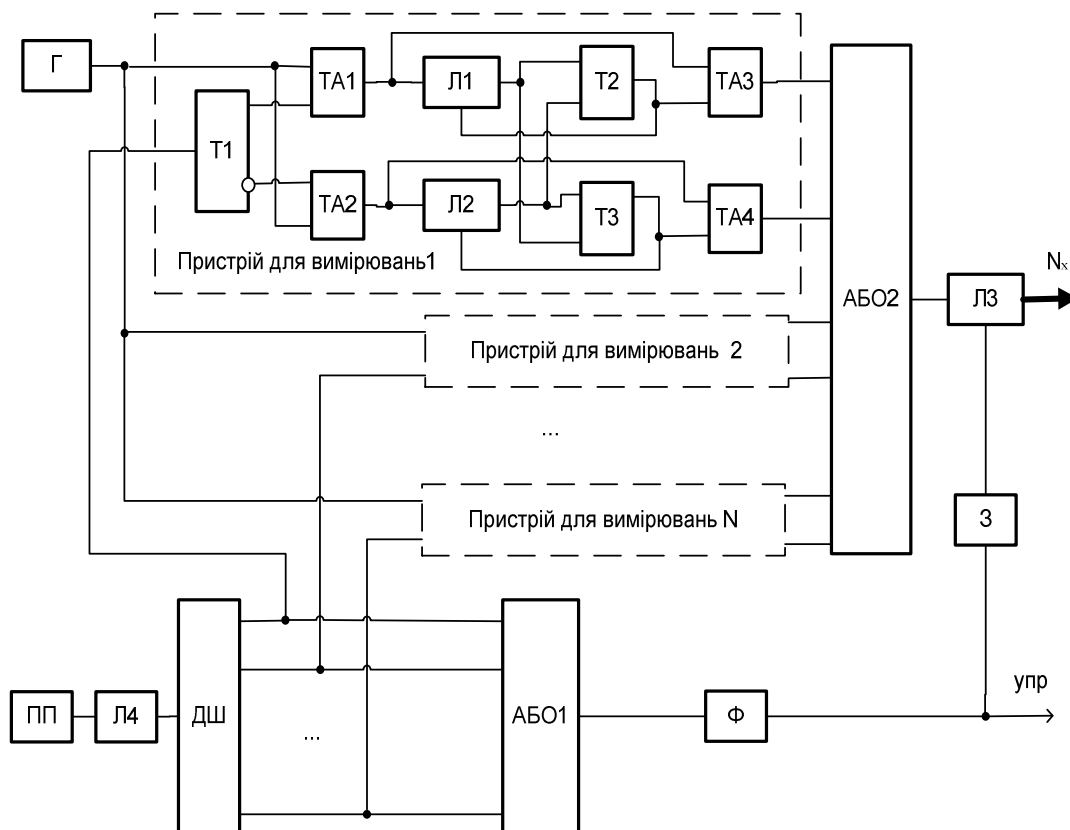


Рисунок 3 – Пристрій компенсації кінематичної похибки

Для аналізу метрологічних характеристик пристрою виконуємо статистичну обробку експериментальних даних. На рис. 4 подано гістограму розкиду вихідного коду вимірювального пристрою. Обсяг вибірки склав 151 вимірювання. Основні статистичні параметри такі

$$\bar{O} = 2.0 \cdot 10^{-4}; \quad \sigma = 0.014248; \quad A = 0.0536; \quad E = -0.449. \quad (12)$$

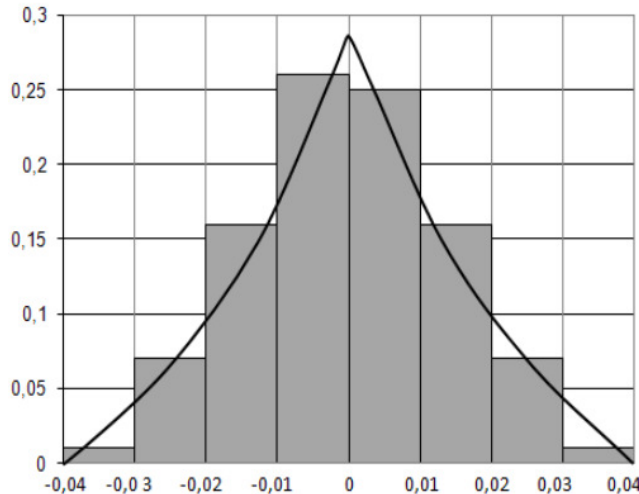


Рисунок 4 – Гистограма розкиду вихідного коду вимірювального пристрою

Рівняння згладженої кривої розкиду вихідного коду пристрою має вигляд

$$f(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при } x \in (-0.04, 0.04). \quad (13)$$

Скористуємось інформаційним підходом для визначення похибки проведених вимірювань із багаторазовими спостереженнями. Для отриманого закону розподілу похибки маємо

$$\ln f(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}. \quad (14)$$

Звідси ентропія похибки запропонованого пристрою

$$H\left(\frac{x}{x_i}\right) = \ln \left(2\sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} \right). \quad (15)$$

Ентропійний інтервал невизначеності вихідного коду пристрою

$$\Delta = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.01465. \quad (16)$$

Обробка сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала дизеля 10Д100 складає такі обчислювальні процедури: розраховуємо середнє значення швидкості обертання; визначаємо масив девіацій у межах усього обсягу дослідних даних; виконуємо процедуру усереднення за всім ансамблем реалізацій та формуємо масив девіацій у межах одного оберту колінчастого вала ДВЗ, який подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є. Ідентичність робочих циклів дизеля 10Д100 оцінюємо за величиною коефіцієнтів D_i , для визначення яких розв'язуємо систему алгебраїчних рівнянь такого вигляду

$$BD = \Delta\omega, \quad (17)$$

де B – матриця, коефіцієнти якої визначаються в залежності від обраного методу розрахунку; D – вектор-стовпець амплітудних коефіцієнтів; $\Delta\omega$ – вектор-стовпець часової реалізації сигналу девіацій швидкості обертання колінчастого вала дизеля 10Д100. При частотному поданні сигналу девіацій коефіцієнти матриці визначаються наступним чином

$$B_{i,j} = \sum_{i=1}^{10} W_1(j\Omega) M_i(j\Omega). \quad (18)$$

Висновки

1. Запропоновано математичну модель валопроводу дизеля 10Д100 у вигляді механічної системи з десятьма ступенями волі.
2. У результаті математичних перетворень отримано передатні функції, які пов'язують впливи окремих циліндрів з сигналом девіацій швидкості обертання першої маси.
3. Комп'ютерним моделюванням отримано сигнал девіацій та в результаті його аналізу сформульовано вимоги до метрологічних характеристик інформаційно-вимірювального пристрою.
4. Доведено, що труднощі організації цифрової обробки частотно-модульованого сигналу з малою глибиною модуляції полягають у наявності кінематичної похибки виготовлення первинних перетворювачів.
5. Запропоновано метод, який апаратно компенсує вказану похибку, та на його основі розроблено оригінальний інформаційно-вимірювальний пристрій. У результаті статистичної обробки дослідних даних із використанням інформаційного підходу визначено його ентропійну похибку. Встановлено придатність пристрою до виконання прецизійних вимірів сигналів девіацій швидкості обертання.
6. На основі частотного подання сигналу девіацій швидкості обертання колінчастого вала розроблено інформаційну технологію оцінювання ідентичності робочих циклів дизеля 10Д100.

Список літератури

1. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых ДВС. – Л: Судостроение, 1968. – 304 с.
2. Допуски и посадки. Справочник. / [Гл. ред. Мягков В.Д.] – Л.: Машиностроение, Часть 2, 1978. – с. 545–1032.
3. А. с. 1538679 СССР. МКИ G 01 M 15/00. Устройство для контроля неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания / Б.Г. Марченко, А.Н. Борисенко, А.Ф. Еникеев. Харьковский политехнический институт. – № 4428977; заявл. 23.05.88; опубл. 15.09.89, Бюл. № 34.
Стаття надійшла: 03.07.2016.

Відомості про авторів

Борисенко Євген Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «ХПІ».

Єнікєєв Олександр Фанилович, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту.