

УДК 681.335.13

Єнікєєв О. Ф., Зателєпіна С. Г., Суботін О. В.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЕВІАЦІЙ МИТТЄВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ

Техніко-економічні показники дизелів залежать від ідентичності робочих циклів [1, 2]. Пропонується ідея використання девіацій швидкості обертання колінчатого валу дизеля у якості інформаційного сигналу для отримання кількісної оцінки ідентичності робочих циклів. Відомі методи та технічні засоби, які знаходяться у експлуатації, не забезпечують потрібну вірогідність та точність оцінювання. Організація системою управління відповідних впливів на процес паливоподачі з метою отримання ідентичних робочих циклів забезпечує підвищення економічності дизелів.

Постановка завдання для досліджень.

Авторами пропонується використання імітаційної моделі колінчатого валу дизеля у вигляді механічної системи з десятьма ступенями волі для отримання сигналу девіацій. Це дозволить сформулювати вимоги до метрологічних характеристик вимірювального пристрою.

Дослідити особливості організації прецизійних вимірів миттєвої швидкості при наявності кінематичної похибки виготовлення первинних перетворювачів. Статистичною обробкою експериментальних даних з використанням інформаційного підходу визначити ентропійну похибку пристрою.

Встановити способи компенсації похибок, та запропонувати оригінальний інформаційно-вимірювальний пристрій для виконання прецизійних вимірів сигналів девіацій швидкості обертання.

Моделювання валопроводу дизеля. При складанні математичної моделі багатоциліндрового двигуна прийнято наступні припущення:

- крутильну схему дизеля 10Д100 подано у вигляді механічної системи, яка має десять ступенів волі;
- не враховується 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 валу біля i -тої маси, $M_i(t)$ – крутячий момент, який діє у i -тому коліні валу, 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 моделі, тому ця система рівнянь являється лінійною.

Для узагальнення результатів досліджень система диференціальних рівнянь (1) приведено до безрозмірного вигляду, виходячи з теорем теорії подібності [3, 4]. Усі подальші дослідження виконано у відносних одиницях. Перехід до іншого типу двигуна, який має подібну кінематичну схему, досягається за допомогою наступних умов подібності:

$$J_\sigma \varphi_\sigma = M_\sigma t_\sigma^2, \quad \varphi_\sigma = e_\sigma M_\sigma. \quad (2)$$

Система рівнянь (1) перетворена за Лапласом при нульових початкових умовах до такого вигляду:

$$\varphi_i(p) = \frac{1}{p^2 + 2} [M_i(p) + \varphi_{i+1}(p) + \varphi_{i-1}(p)]. \quad (3)$$

Звідси за допомогою теорії сигнальних графів отримано передатні функції, які пов'язують зображення за Лапласом впливів циліндрів та коливання маси біля якої встановлено первинний перетворювач.

Передаточні функції каналів передач циліндр-колінчатий вал отримано математичним перетворенням системи рівнянь (3) до наступного вигляду:

$$W_{i,1}(p) = \frac{N_i(p)}{R(p)}, \quad i = 1, 2, \dots, 10, \quad (4)$$

де i – номер циліндру; $N(p), R(p)$ – ступеневі поліноми такого вигляду:

$$R(p) = p^{20} + 18p^{18} + 137p^{16} + 560p^{14} + 1339p^{12} + 1730p^{10} + 575p^8 - 870p^6 - 2653p^4 - 466p^2 - 388,$$

$$N_1(p) = p^{18} + 17p^{16} + 120p^{14} + 455p^{12} + 982p^{10} + 1110p^8 + 288p^6 - 805p^4 - 871p^2 - 291,$$

$$N_2(p) = p^{16} + 15p^{14} + 91p^{12} + 286p^{10} + 482p^8 + 367p^6 - 39p^4 - 239p^2 - 105,$$

$$N_3(p) = p^{14} + 13p^{12} + 66p^{10} + 165p^8 + 201p^6 + 78p^4 - 53p^2 - 41,$$

$$N_4(p) = p^{12} + 11p^{10} + 45p^8 + 84p^6 + 65p^4 + 4p^2 - 13,$$

$$N_5(p) = p^{10} + 9p^8 + 28p^6 + 35p^4 + 13p^2 - 2,$$

$$N_6(p) = p^8 + 7p^6 + 15p^4 + 10p^2 + 1, \quad N_7(p) = p^6 + 5p^4 + 6p^2 + 1,$$

$$N_8(p) = p^4 + 3p^2 + 1, \quad N_9(p) = p^2 + 1, \quad N_{10}(p) = 1.$$

Архітектура моделі кінематичної схеми дизеля 10Д100 подано на рис. 1.

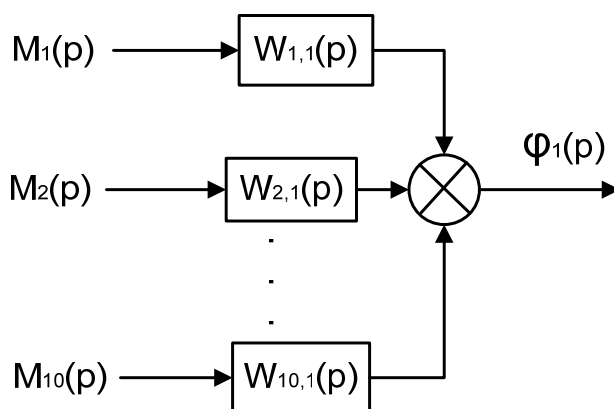


Рис. 1. Модель кінематичної схеми дизеля 10Д100

Крутячий момент подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є. Зміни у налаштуванні подачі палива до окремого циліндру подаємо у вигляді амплітудного коефіцієнту D_i . Математично крутячий момент, який утворює на валу дизеля окремий циліндр, описується таким рівнянням:

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

Дев'яці миттєвої швидкості обертання колінчатого валу дизеля пов'язані з кутами закрутки таким чином:

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

Перетворення за Лапласом при нульових початкових умовах останнього рівняння дає наступний вираз:

$$\Delta\omega_1(p) = p\varphi_1(p). \quad (6)$$

Імітаційним моделюванням отримано графіки девіації миттєвої швидкості обертання першої маси у межах одного оберту колінчатого валу при різноманітних розрегулюваннях робочих циклів дизеля (рис. 2). Ці розрегулювання імітувались відключенням подачі палива до першого ($D_1 = 0$) та другого ($D_2 = 0$) циліндрів.

З аналізу графіків встановлено, що амплітудне значення девіацій не перевищує 0,05 миттєвої швидкості обертання колінчатого валу. Тому процедура вимірювань сигналу девіацій є достатньо складною і потребує розробки високоточного методу та застосування відповідних технічних засобів.

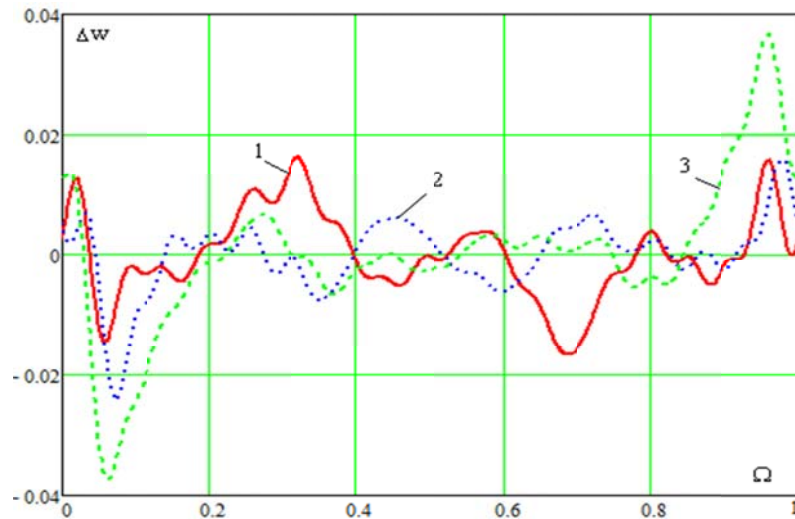


Рис. 2. Девіації обертання першої маси:

1 – штатне налаштування; 2 – паливо не подається до першого циліндра; 3 – паливо не подається до другого циліндра

Розробка пристрою для вимірювань. Почнемо з аналізу складових похибки первинного перетворювача:

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

$$\delta_s = \frac{t_0}{8} \sqrt{0.1 \sum_{i=1}^{10} \Omega_i^4} 100\%; \quad (7)$$

– кінематична похибка первинного перетворювача, яку визначено на прикладі дослідження допусків на виготовлення зубчастих коліс різного класу точності та подано у табл. 1;

– динамічна похибка первинного перетворювача.

Таблиця 1

Чисельні дані кінематичної похибки

Клас точності ПП	4	5	6	7	8
Відносна похибка, %	0.80	1.25	2.00	2.75	4.00

Проблема організації прецизійних вимірювань девіацій полягає в розробці технічних засобів для зменшення величини кінематичної похибки виготовлення первинних перетворювачів. Запропоновано апаратний метод для компенсації кінематичної похибки.

Цей метод полягає в організації багатоканальних вимірювань інтервалів часу, які формуються одною рисою первинного перетворювача та відповідають повному оберту його вала. Вихідний сигнал первинного перетворювача за допомогою лічильника та дешифратора перетворюється у декілька імпульсних послідовностей, які відповідають моментам часу проходження біля чутливого елемента датчика однієї риси та подаються на вхід відповідного пристрою для вимірювань.

Кількість каналів пристрою для вимірювань інтервалів часу визначається кількістю рисок первинного перетворювача.

Технічну реалізацію пристрою виконано на основі дискретизації за часом сформованих інтервалів. Усунення взаємних накладань вимірювальної інформації каналів при їхньому поєднанні у сигнал для пристрою цифрової обробки 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. Поєднання вихідних сигналів каналів в сигнал вимірювальної інформації виконується за допомогою схеми АБО. Кількість імпульсів цього сигналу за допомогою лічильника перетворюється у двійковий код, який накопичується у оперативній пам'яті мікроконтролеру.

Інформаційна технологія обробки сигналу миттєвої швидкості цим блоком складається з таких обчислювальних процедур: виділення сигналу девіацій та його подання у вигляді обмеженого ряду Фур'є.

При таких вимірюваннях сигналу миттєвої швидкості кінематична похибка не впливає на тривалість сформованих інтервалів часу. Зрушення за часом дискретних відліків часової реалізації сигналу девіацій, які виникають як наслідок кінематичної похибки виготовлення первинного перетворювача, являють собою динамічну похибку.

Проведено оцінювання динамічної похибки зрушень за часом дискретних відліків сигналу девіацій. Її абсолютне значення визначено таким чином:

$$\Delta_{\text{дин}} = \frac{1}{z} \sum_{i=0}^{z-1} [\Delta\omega(i\Delta t + \sigma_{\text{см}}) - \Delta\omega(i\Delta t)], \quad (8)$$

де z – кількість рисок первинного перетворювача, σ_{ni} – допуск на виготовлення зубчастого колеса заданого класу точності, $\Delta\omega$ – девіації швидкості обертання.

З точністю до величин другого порядку меншості відносно динамічної похибки первинного перетворювача підсумок замінюємо інтегралом:

$$\Delta_{\text{дин}} = \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta\omega(\Omega t + \Omega\sigma_{\text{см}}) - \Delta\omega(\Omega t)] dt, \quad (9)$$

для гармонійного сигналу вираз (2) після математичних перетворень набуває наступного вигляду:

$$\Delta_{\text{дин},i} = \frac{2A_i}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{\text{см}}) \sin(i\Omega\sigma_{\text{см}}). \quad (10)$$

Відносну похибку гармонійного сигналу отримано у такому вигляді:

$$\delta_i = \frac{2}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma_{\text{см}}) \sin(i\Omega\sigma_{\text{см}}). \quad (11)$$

Динамічну похибку первинного перетворювача авторами визначено з урахуванням внесків гармонійних складових до сигналу девіацій:

$$\delta_{\text{дин}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_i \delta_i)^2}{\sum_{i=1}^{10} A_i^2}} \quad (12)$$

Результати розрахунків динамічної похибки первинного перетворювача довели ефективність запропонованого методу апаратної компенсації кінематичної похибки первинного перетворювача.

На підставі цього методу розроблено оригінальний пристрій для вимірювань миттєвої швидкості обертання валу дизеля (рис. 3), який описано в роботі [5].

На рис. 4 позначено: N_x – вихідний код; N – кількість каналів для вимірювань; Γ – взірцевий генератор; ДШ – дешифратор; Φ – формувач коротких імпульсів; TA_1, \dots, TA_4 – логічні схеми ТА; ПП – первинний перетворювач; АБО1, АБО2 – логічні схеми АБО; 3 – лінія затримки; T_1, \dots, T_3 – тригера; Л1, ..., Л4 – лічильники імпульсів.

Пристрій для вимірювань має два незалежні канали, які вимірюють тривалість імпульсів прямого та інверсного виходів T_1 .

Лічильники Л1 та Л2 формують калібровані проміжки часу.

Сигнал вимірювальної інформації формує схема АБО2.

Лічильник Л3 перетворює кількість імпульсів у цифровий код.

Блок Φ формує сигнал запису коду у регістр пристрою цифрової обробки та за допомогою блоку 3 переводить Л3 до нульового стану.

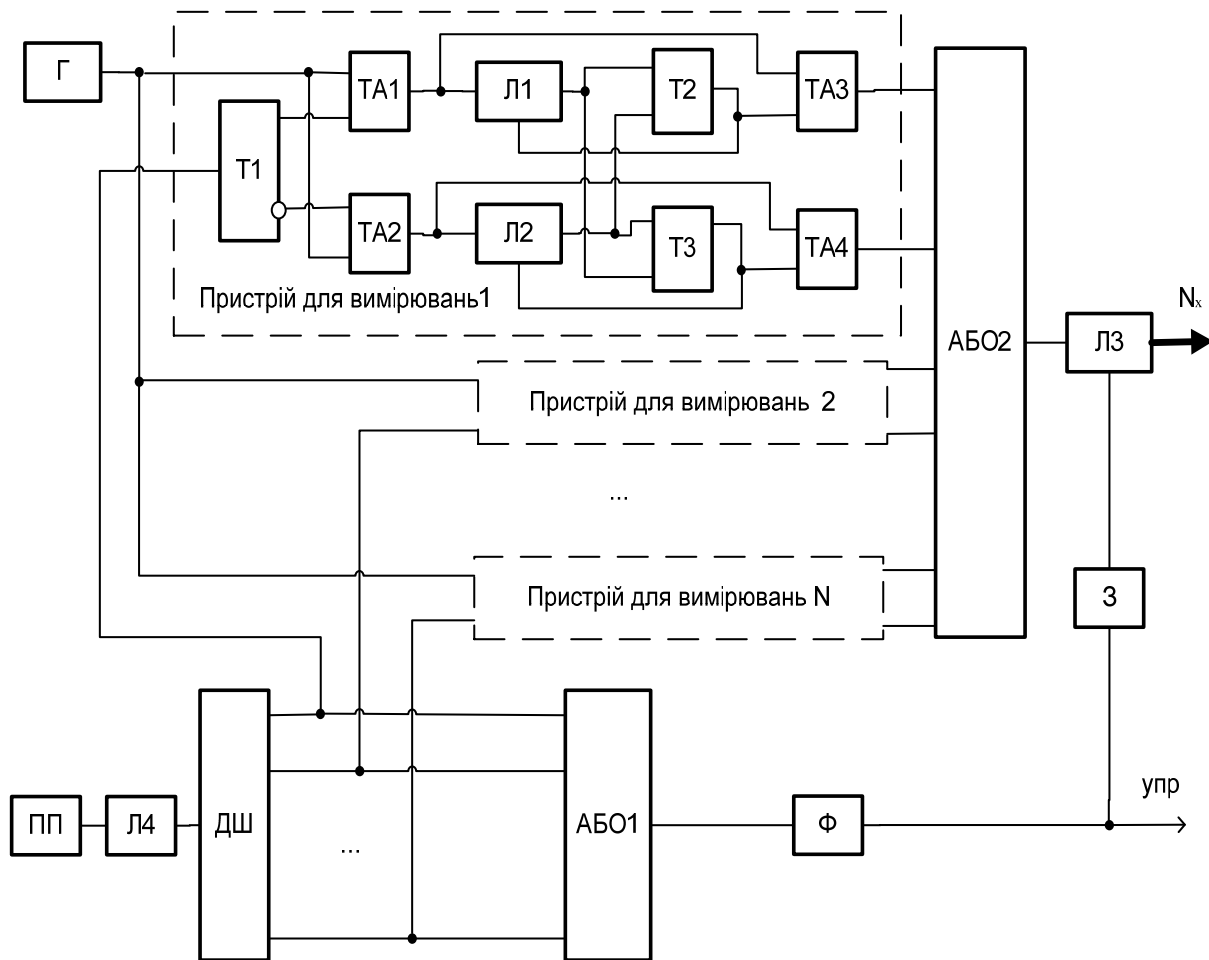


Рис. 3. Пристрій компенсації кінематичної похибки

Аналіз метрологічних характеристик пристрою. Для цього виконуємо статистичну обробку експериментальних даних. Обсяг вибірки склав 151 вимірювання. Основні статистичні параметри такі:

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

Рівняння згладженої кривої розкиду вихідного коду пристрою має вигляд:

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

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

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

Звідси ентропія похибки запропонованого пристрою:

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

Ентропійний інтервал невизначеності вихідного коду пристрою:

$$\Delta = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.01465.$$

ВИСНОВКИ

Запропоновано імітаційну модель колінчатого валу дизеля у вигляді механічної системи з десятьма ступенями волі. Імітаційним моделюванням отримано сигнал девіацій та у результаті його аналізу сформульовано вимоги до метрологічних характеристик вимірювального пристрою.

Доведено, що проблема організації прецизійних вимірів миттєвої швидкості полягає у наявності кінематичної похибки виготовлення первинних перетворювачів. Запропоновано метод, який апаратно компенсує вказану похибку, та на його основі розроблено оригінальний інформаційно-вимірювальний пристрій.

Статистичною обробкою експериментальних даних з використанням інформаційного підходу визначено ентропійну похибку пристрою.

Встановлено придатність пристрою до виконання прецизійних вимірів сигналів девіацій швидкості обертання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Истомин П. А. Крутильные колебания в судовых ДВС / П. А. Истомин. – Л.: Судостроение, 1968. – 304с.
2. Попович В. С. Анализ резонансных процессов при крутильных колебаниях в ДВС / В. С. Попович, А. А. Жердев // Ползуновский вестник. – 2013. - № 4/3. С. 151–157.
3. Попович В. С. Экспериментальные методы исследования напряженного и деформированного состояния деталей машин: учебное пособие. – 2-е изд. перераб. и доп. /В. С. Попович; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : изд. АлтГТУ, 2009. – 108 с.
4. Пат. № 59176 РФ, МПК F 16F 7/00. Маховик дизеля с демпфером / Покусаев М. Н., Сибряев К. О. (Российская Федерация); опубл. 10.12.2006; бюл. № 34.
5. А.с. № 1538679 (СССР). Устройство для контроля неравномерности вращения вала / Марченко Б. Г., Борисенко А. Н., Еникеев А. Ф.