

О. Ф. Єнікєєв¹
Д. Ю. Захарєнков²

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЕРУВАННЯМ ПОДАЧЕЮ ПАЛИВА ЗА УМОВ НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

¹Донбаська державна машинобудівна академія;

²Національний технічний університет «ХПІ»

Запропоновано непрямий метод оцінювання ідентичності робочих циклів силових агрегатів. В якості джерела вхідної інформації обрано частотно-модульований сигнал швидкості обертання колінчастого валу. Із використанням форсунок, які мають засоби п'єзоелектричного керування, розроблено концептуальні засади програмних рухів апаратних засобів щодо забезпечення ідентичності робочих циклів. Методи безпосереднього цифрового керування та керування зі зворотнім зв'язком використано про розробляння архітектури апаратних засобів. Апроксимацію крутного моменту окремого циліндра проведено на основі перетворення Фур'є із урахування послідовності їхньої роботи. Запропоновано механічну систему з чотирма ступенями волі в якості детермінованої математичної моделі крутної схеми силового агрегату. Рухи мас моделі описано системою диференціальних рівнянь за умови врахування тертя. Параметри системи нормалізовано та використано перетворення Лапласа за нульових початкових умов для її розв'язання. Встановлено інформаційні зв'язки між крутними моментами та сигналом вимірювальної інформації за допомогою методу визначників та теорії сигнальних графів. Встановлено, що ці методи дають практично однакові результати розрахунку. Алгоритмічне забезпечення оцінювання ідентичності робочих циклів побудовано на розв'язанні перевизначеної системи алгебраїчних рівнянь з оптимізацією результату на основі методу найменших квадратів. При комп'ютерній імітації випадкових завад у якості математичного апарату використано метод Монте-Карло. Комп'ютерним моделюванням впливів завад на сигнал вимірювальної інформації та на фазові запізнення окремих циліндрів встановлено вимоги щодо метрологічних характеристик апаратних засобів.

Ключові слова: апаратні засоби, комп'ютерна система керування, алгоритмічне забезпечення, вимірювальний перетворювач, прикладне програмне забезпечення, частотно-модульований сигнал, невизначеність, швидкодія.

Вступ

Техніко-економічні показники дизель-генераторів (ДГ) визначає штатне налаштування робочих циклів силового агрегату [1-3]. Найбільш розповсюдженим методом моніторингу циліндрових потужностей силових агрегатів є вимірювання тиску циліндрів за допомогою аналого-цифрового перетворювача E14-140 фірми L-Card, первинного перетворювача 8QP505CS фірми AVL та програмного забезпечення «Power Graph». За результатами моніторингу отриманих індикаторних діаграм апаратно-програмні засоби формують сигнали керування п'єзоелектричними форсункам, які корегують налаштування процесів подачі палива та повітря у циліндри. Використання ручної праці, відсутність алгоритмічного забезпечення і значні апаратні витрати обмежують застосування даного методу. Авторами пропонується використати частотно-модульований сигнал швидкості обертання колінчастого валу в якості джерела вхідної інформації. Можливості використання сучасних апаратно-програмних засобів щодо забезпечення потрібної швидкодії керування п'єзоелектричними форсунками суттєво зменшує наявність інтервалу невизначеності навколо оптимальних кутів випередження подачі палива в окремі циліндри. Тому **актуальною** є задача розробляння алгоритмічного та прикладного програмного забезпечення моніторингу циліндрових потужностей силових агрегатів на основі опрацювання сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу, які зменшують невизначеність та збільшують швидкодію. Вдале розв'язання цієї науково-прикладної задачі забезпечить економію палива на рівні 5% [4], суттєво збільшить термін використання силового агрегату й скоротить витрати на профілактику, обслуговування та ремонт.

Метою статті є зменшення невизначеності та підвищення швидкодії відомих методів моніторингу циліндрових потужностей силових агрегатів, розробляння алгоритмічного та прикладного

програмного забезпечення опрацювання вхідної інформації.

Постановка задачі

У роботі [5] запропоновано методика діагностування багатоциліндрових двигунів із використанням сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого вала, який отримано у результаті комп'ютерного моделювання. Ідентифікацію параметрів моделі проведено на основі опрацювання дослідних даних. Методика враховує особливості роботи двигунів у випадку накладення сусідніх крутних моментів. У роботі [6] розглянуто методи подання періодично корельованими випадковими процесами закономірностей приросту у часі оцінок циліндрових потужностей силового агрегату та доведена ефективність їхнього використання. У роботі [7] розроблено вимірювальний перетворювач сигналу флуктуацій та інформаційну технологію його опрацювання із визначенням середнього ефективного тиску, потужності двигуна, коефіцієнту надлишку повітря та температури випускних газів. У роботі [8] запропоновано метод зменшення невизначеності керування процесом подачі палива на основі вимірювань амплітуди коливань кутової швидкості обертання та зсувів за фазою їхніх екстремумів відносно верхньої мертвої точки заданого циліндру. У роботі [9] запропоновано методика корегування параметрів циклової подачі палива, ідентичність якої встановлюється на основі опрацювання сигналу нерівномірності обертання колінчастого вала ДГ. З метою зменшення впливу завад на інформаційний сигнал флуктуацій у роботі [10] запропоновано використати фільтр верхніх частот із кінцевою імпульсною характеристикою. Розроблено методика обробляння сигналу нерівномірності обертання колінчастого вала із використанням можливостей програмного середовища Matlab. Недоліком відомих методів керування процесами подачі паливно-повітряної суміші у циліндри силових агрегатів за результатами опрацювання сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастих валів є зavelика невизначеність апаратних засобів та відсутність програмного забезпечення.

Результати дослідження

Концептуальні засади програмних рухів апаратних засобів щодо керування процесами подачі паливно-повітряної суміші авторами розроблено на основі методу безпосереднього цифрового керування, принципу замкненого керування із використанням зворотного зв'язку за станом сигналу флуктуацій швидкості обертання колінчастого вала. Синхронізацію роботи апаратно-програмних засобів опрацювання даних непрямих вимірювань із фазою обертання колінчастого вала забезпечує сигнал верхньої мертвої точки першого циліндру. На рис. 1 подано архітектуру комп'ютерної системи програмного керування подачею палива на основі опрацювання частотно-модульованого сигналу швидкості обертання колінчастого вала. До її складу входять такі апаратні засоби: давач миттєвої швидкості обертання колінчастого вала (ДЧ), давач верхньої мертвої точки першого циліндру (ДВМТ), вимірювальний перетворювач (ВП) частотно-модульованого сигналу, обчислювальний пристрій (мікроЕОМ) та три виконавчі механізми (ВМ1, ВМ2 та ВМ3) на базі п'єзoeлектричних форсунок.

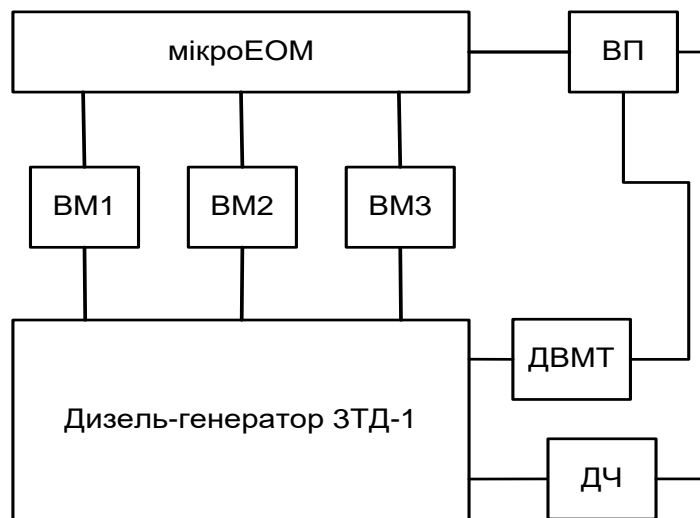


Рис. 1 – Архітектура апаратних засобів керування подачею палива

Алгоритмічне забезпечення моніторингу циліндрових потужностей передбачає виконання наступних дій:

- вимірювання миттєвих періодів частотно-модульованого сигналу швидкості обертання колінчастого валу;
- усереднення отриманої інформації та формування вибірки даних у межах одного оберту колінчастого валу;
- визначення середнього значення періоду частотно-модульованого сигналу швидкості обертання;
- розрахунок елементів масиву дискретних значень сигналу флуктуацій шляхом встановлення різниці між середнім та миттєвим значенням періоду;
- побудова механічної моделі крутної схеми силового агрегату;
- розроблення детермінованої математичної моделі рухів мас крутної схеми;
- вибір метода та розв'язання детермінованої системи лінійних диференціальних рівнянь рухів мас з метою встановлення інформаційних зв'язків між крутними моментами циліндрів й сигналом вимірювальної інформації;
- апроксимація крутних моментів циліндрів;
- розв'язання системи алгебраїчних рівнянь для встановлення циліндрових потужностей;
- визначення відхилень циліндрових потужностей від середнього значення;
- формування сигналів керування VM1, VM2 та VM3.

При апроксимації крутного моменту, який створює на колінчастому валу окремий циліндр, у якості математичного апарату подання авторами використано перетворення Фур'є. Дискретний частотний спектр крутного моменту від дії газових сил отримано у результаті опрацювання індикаторної діаграми першого циліндру та подано у табл. 1.

Табл. 1 – Амплітуди синусних та косинусних гармонійних складових

A_n , Нм	954.7	854.9	555.3	366.2	241.0	162.8
B_n , Нм	322.0	-24.1	-68.0	-82.0	-106.2	-86.4

На підставі даних цієї таблиці крутний момент першого циліндру силового агрегату від дії газових сил математично подається наступним виразом

$$M_1(t) = \sum_{n=1}^6 (A_n \sin n\Omega t + B_n \cos n\Omega t). \quad (1)$$

Різницевий крутний момент, який забезпечує обертання колінчастого валу ДГ ЗТД-1 із заданою кутовою швидкістю, визначимо за допомогою виразу

$$M_p(t) = M_1(t) - M_2(t), \quad (2)$$

де $M_2(t)$ – крутний момент, який отримано у результаті опрацювання діаграми стиснення.

При такому поданні програмне керування процесами подачі паливно-повітряної суміші в циліндри силового агрегату авторами організовано так $D_i - 1 \rightarrow 0$. Відповідно запропоновано різницевий крутний момент окремого циліндру подати у вигляді виразу (2), амплітуду яких визначають вагові коефіцієнти циліндрів $D_i = 0 \dots 1$. Відповідно встановлення величин цих коефіцієнтів є основною задачею моніторингу циліндрових потужностей. На підставі цих міркувань вираз (2) набуває наступного вигляду

$$M_1(t) = D_i M_p(t) + M_2(t) \quad (3)$$

Фазове запізнення крутних моментів 2 та 3 циліндрів відносно першого кратно 120° й розраховується із урахуванням такої послідовності їхньої роботи: 1-2-3. Відповідно подання крутного моменту довільного циліндру набуває такого вигляду

$$M_i(t) = M_1(t) e^{-j\Omega\tau_i} \quad (4)$$

У результаті аналізування крутної схеми ДГ ЗТД-1 авторами пропонується: для отримання вхідної інформації використати впускний колінчастий вал, що суттєво обмежує кількість мас механі-

чної моделі силового агрегату; первинний перетворювач миттєвої швидкості обертання встановити біля першого циліндру; за умови врахування тертя та коливань між масами крутильну схему подати у вигляді механічної системи, яка має чотири ступені волі. Динаміка обертання циліндрових мас детермінованої математичної моделі силового агрегату описується наступними диференціальними рівняннями [11, 12]

$$J_i \varphi_i''(t) + \beta \varphi_i'(t) - e^{-1}[\varphi_{i+1}(t) - \varphi_i(t)] + e^{-1}[\varphi_i(t) - \varphi_{i-1}(t)] = M_i(t), \quad (5)$$

де $i = 1, 2, \dots, 4$, $e = c^{-1}$ – податливість зв'язків між масами колінчастого валу.

За допомогою теорем теорії подібності [11, 12] систему диференціальних рівнянь (5) приведемо до безрозмірного вигляду, при цьому узагальнюються результати досліджень. Поміж можливих чисельних методів для її розв'язування перевагу надано перетворенню Лапласу за нульових початкових умов. Після математичних перетворень система рівнянь (5) набуває такого вигляду

$$(J_i p^2 + p + 2)\varphi_i(p) - \varphi_{i+1}(p) - \varphi_{i-1}(p) = M_i(p). \quad (6)$$

Введено наступні позначення

$$a = b = (p^2 + p + 1)^{-1}, \quad c = d = (p^2 + p + 2)^{-1}, \quad f = (0.315p^2 + p + 1)^{-1}. \quad (7)$$

Із урахуванням цих позначень система рівнянь (6) набуває такого вигляду

$$\begin{cases} \varphi_1 - a\varphi_2 = bM_1 \\ \varphi_2 - d\varphi_3 - d\varphi_1 = cM_2 \\ \varphi_3 - d\varphi_4 - d\varphi_2 = cM_3 \\ \varphi_4 - f\varphi_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Для встановлення інформаційних зв'язків між крутними моментами циліндрів та сигналом флуктуацій швидкості обертання першої маси колінчастого вала авторами використано метод визначників та топографічне правило теорії сигнальних графів. Як наслідок математичних перетворень системи диференціальних рівнянь (5) отримано передавальні функції механічних каналів передавання крутних моментів циліндрів. Відповідно ця система рівнянь набуває вигляду

$$\varphi_1(p) = \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j}{\Delta} M_j(p) = \sum_{j=1}^3 W_j M_j(p), \quad (9)$$

де $\varphi_1(p)$ – перетворення за Лапласом частотно-модульованого сигналу швидкості обертання першої маси, W_j – передавальні функції, які встановлюють інформаційні зв'язки між крутними моментами окремих циліндрів та сигналом флуктуацій, Δ, Δ_j – головний та усі визначники системи рівнянь.

Інформаційна технологія розрахунку у програмному середовищі Matlab логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАЧХ) передбачає наступне [13]:

- командний рядок для задавання виразів передавальних функцій має, наприклад, такий вигляд $a = \text{tf}([1], [1 \ 1 \ 1])$;

- ЛАЧХ каналів будується за допомогою команди $\text{bode}(W1, W2, W3)$. Результати розрахунку подано на рис. 2;

- встановлення особливих точок передавальних функцій виконано за допомогою команд $\text{zero}(W1)$ та $\text{pole}(W1)$;

- годографи Найквіста будуються за допомогою команди $\text{nyquist}(W1, W2, W3)$ та наведено на рис. 3.

ЛАЧХ каналів передавання крутних моментів, які побудовано для двох методів розрахунку, наведено на рис. 2. У результаті порівняння особливих точок передавальних функцій встановлено, що використані методи дають практично однакові результати розрахунку.

Алгоритмічне забезпечення моніторингу циліндрових потужностей розроблено на основі часового та частотного подання сигналу вимірювальної інформації, реалізує принцип керування за відхиленням та побудовано на встановленні величин вагових коефіцієнтів циліндрів. Для цього розв'язується система алгебраїчних рівнянь такого вигляду

$$BD = \varphi_1 - \varphi_{1,0}, \quad (10)$$

де B – матриця, коефіцієнти якої визначаються на основі передавальних функцій та крутних моментів в залежності від обраного методу розрахунку; D – вектор-стовпець вагових коефіцієнтів; φ_1 – вектор-стовпець сигналу флуктуацій першої маси; $\varphi_{1,0}$ – вектор-стовпець сигналу флуктуацій першої маси, за відсутності подачі палива у циліндри.

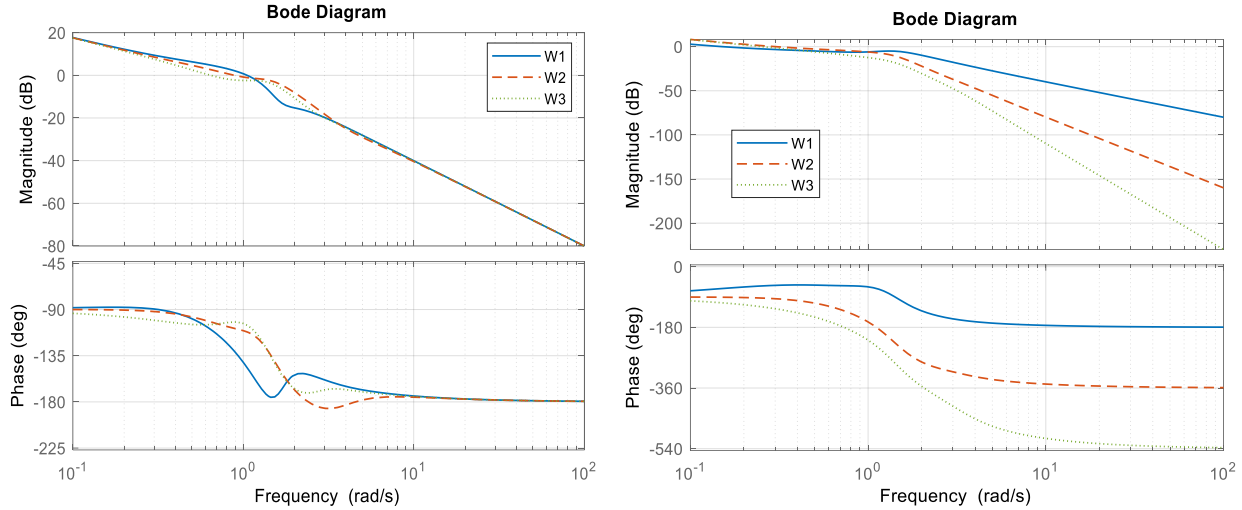


Рис. 2 – ЛАЧХ механічних каналів передавання крутних моментів

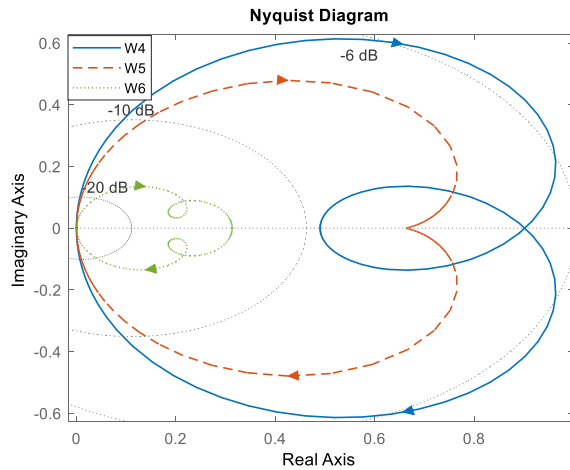


Рис. 3 – Годографи Найквіста

При порівнянні двох методів подання сигналу флуктуацій встановлено, що вони забезпечують достатньо близьку швидкодю розрахунків [14]. Пропонується алгоритм отримання оцінок вагових коефіцієнтів, який розробляється на основі кореляційного методу аналізу [15]. Цей метод забезпечує суттєве покращення співвідношення сигнал-завада у вимірвальній реалізації флуктуацій швидкості обертання колінчастого валу. Аналітичний вираз для взаємної кореляційної функції між часовою реалізацією флуктуацій швидкості обертання першої маси $\varphi_1(t)$ та реакцією $y_1(t)$ на крутний момент відповідного циліндру отримано в наступному вигляді

$$R_1(\tau) = \sum_{i=1}^3 D_i R_{2,i}(\tau) + R_{\Pi,1}(\tau), \quad (11)$$

де $R_{\Pi,1}(\tau)$, $R_{2,i}(\tau)$ – взаємні кореляційні функції відповідно між сигналом випадкової завади та крутним моментом першого циліндру, а також між крутними моментами від i -того та першого циліндрів.

За умови опрацювання дискретних сигналів взаємна кореляційна функція між крутним моментом першого циліндру та сигналом флуктуацій швидкості обертання першої маси колінчастого

валу силового агрегату розраховується таким чином

$$\begin{aligned}
 R_{M,\varphi}(0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_1(t_i) \varphi_1(t_i); \\
 R_{M,\varphi}(1) &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} M_1(t_{i+1}) \varphi_1(t_i); \\
 &\vdots \\
 R_{M,\varphi}(N-1) &= M_1(t_{N-1}) \varphi_1(t_1).
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Обсяг розрахунків по виразам (11) залежить від кількості інтервалів дискретизації сигналу вимірювальної інформації за один оберт колінчастого валу. При комп'ютерній імітації випадкових завад у якості математичного апарату авторами використано метод Монте-Карло. Усі відомі первинні перетворювачі миттєвої швидкості обертання колінчастих валів при формуванні сигналів вимірювальної інформації реалізують окремі випадки схеми Ламера.

$$x_{n+1} = (ax_n + c) \bmod m, \quad n \geq 0, \tag{13}$$

де $x_0 \geq 0$ – початкове значення; $m > x_0, m > a, m > c$ – модуль, який задає швидкість побудови чисел; $c \geq 0$ – прирощення; $a \geq 0$ – множник, який задає період максимальної довжини ряду чисел.

На рис. 4 подано графіки невизначеності встановлення величин вагових коефіцієнтів циліндрів. При їхньому розрахунку використано: адитивну випадкову заваду ($\delta_4 = 1.0\%$), яка генерується за схемою Ламера та впливає на вимірювальний сигнал флуктуацій швидкості обертання першої маси; випадкову заваду (δ_5), яка змінює фазові запізнення циліндрів відносно першого й для її комп'ютерній імітації використано стандартний алгоритм. Обчислювальна процедура розрахунку невизначеностей (за такої умови $\Delta_i = D_i - 1$) полягає у розв'язанні наступної системи алгебраїчних рівнянь

$$BDe^{j\delta_5(t)} = \varphi_1 + \delta_4(t). \tag{14}$$

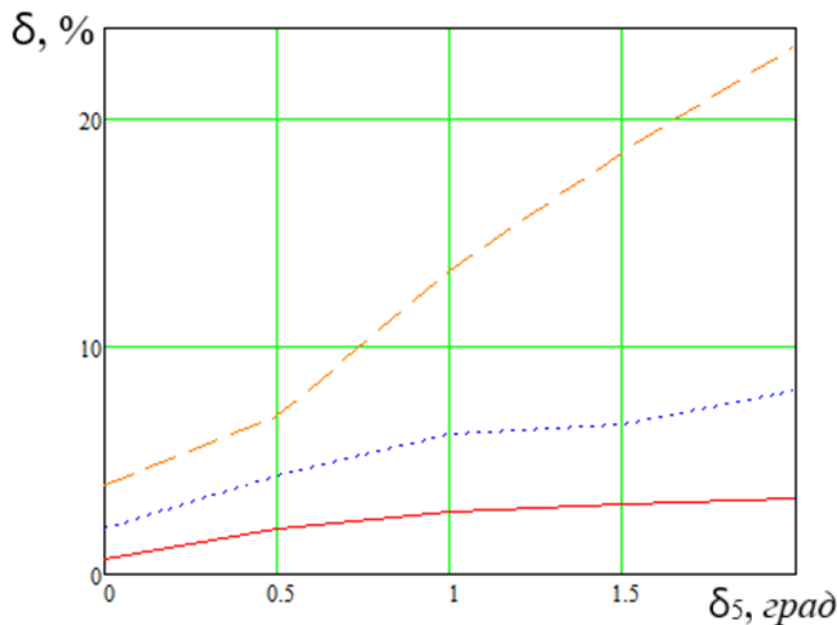


Рис. 4 – Графіки невизначеності (D_1 - безперервний, D_2 - точковий, D_3 - штриховий)

Висновки

Розроблено концепцію програмних рухів апаратних засобів щодо керування процесами подачі паливно-повітряної суміші. Серед розглянутих математичних моделей подання крутної схеми ДГ

ЗТД-1 найбільш повно специфіки поставленої задачі відповідає детермінована механічна система із чотирма ступенями волі. Динаміку рухів мас математичної моделі із врахуванням тертя описано системою диференціальних рівнянь другого порядку, параметри якої нормалізовано на основі теорем теорії подібності. Серед можливих методів розв'язування системи лінійних диференціальних рівнянь перевагу надано використанню перетворення Лапласу. Отримано передавальні функції, які встановлюють інформаційні зв'язки між крутними моментами циліндрів і сигналом флюктуацій швидкості обертання першої маси колінчастого валу. Встановлено, що використання визначників та методів теорії сигнальних графів дають практично однакові вирази для передавальних функцій. Алгоритмічне забезпечення моніторингу циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 побудовано на основі часового та частотного подання сигналу вимірювальної інформації. Проведено комп'ютерне моделювання обчислювальної процедури встановлення вагових коефіцієнтів циліндрів за умови дії випадкових завад на коефіцієнти системи алгебраїчних рівнянь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Challen B., Baranescu R. Diesel Engine Reference Book. Butterworth-Heinemann, 1999. 682 p.
- [2] Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. Vol. 2(3). Pp. 433-441.
- [3] Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3. No 6. Pp. 782-787.
- [4] Білик С. Ю., Божко Е. В. Аналіз методів та способів діагностування двигунів внутрішнього згоряння методами нерозбірного контролю. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 4 (10). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01.
- [5] Сивяков Б.К., Трюбер С.С. Диагностика многоцилиндровых двигателей с помощью неравномерности частоты вращения // *Вестник СГТУ*. – 2010. – № 1 (44). – С. 76 – 82.
- [6] Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Диагностика цилиндрико-поршневой группы дизель-электрического генератора по неравномерности вращения его вала: часть 1. *Техническая электродинамика*. 1998. № 5. С. 36-40.
- [7] Покусаев М. Н., Сибиряков К. О., Шевченко А. В. Экспериментальное определение степени неравномерности вращения вала машинно-двигательного комплекса судна пр. 1557. *Вестник АГТУ*. 2008. №2(43). С. 140-144.
- [8] Гребенников С. А., Гребенников А. С., Никитин А. В. Адаптивное управление топливоподачей ДВС по показателям неравномерности вращения коленчатого вала. *Вестник СГТУ*. 2013. №2 (71). С. 80 – 83.
- [9] Баширов Р. М., Инсафудинов С. З., Сафин Ф. Р. Неравномерность топливоподачи в дизелях: проблемы и методы их решения. *Известия ОГАУ*. 2019. № 1(75). С. 78-82.
- [10] Боднар Б.Є., Очкасов О.Б., Черняев Д.В. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого валу дизеля // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 1(43). – С. 113 – 118.
- [11] Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. *Measurement techniques USSR*. 1988. Volume: 31. Issue: 9. Pages: 868-871. DOI: 10.1007/BF00863884.
- [12] Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2019. No 4. Pp. 85-91. <http://dx.doi.org/10.15407/techned2019.04.085>
- [13] Ayasun S, Nwankpa C.O. *Transformer tests using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses*. Online ISSN:1099-0542 Wiley Periodicals, Inc. Comput Appl Eng Educ, Vol. 14, No.2, 2006, pp. 142-150. DOI 10.1002/cae.20077.
- [14] Yenikieiev O., Zakharenkov D., Gasanov M., Yevsyukova F., Naboka O., Ruzmetov A. Improving the Productivity of Information Technology for Processing Indirect Measurement Data. *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2022*. Pp 80-94. DOI: 10.1007/978-3-031-15944-2_8.
- [15] Бендат Д., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. Москва: Мир, 1983. 312 с.

REFERENCES

- [1] Challen B., Baranescu R. Diesel Engine Reference Book. Butterworth-Heinemann, 1999. 682 p.
- [2] Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D., Kunamalla S. Cylinder Imbalance Detection of Six Cylinder DI Diesel Engine Using Pressure Variation. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010. Vol. 2(3). Pp. 433-441.
- [3] Gawande S., Navale L., Nandgaonkar M., Butala D. Harmonic Frequency Analysis of Multi-Cylinder Inline Diesel Engine Genset for Detecting Imbalance. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3. No 6. Pp. 782-787.
- [4] Bilyk S., Bozhko E. Analysis of methods and methods of diagnosing internal combustion engines by non-assembly control methods. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 4(10), pp. 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2021.04.01.
- [5] Sivyakov B.K., Truber S.S. Diagnostika na mnogotsilindrovi dvigateli s pomoshhtta na neravnomernost na chestotata na vurtene Vestnik SGTU. - 2010. - № 1 (44). - S. 76 - 82.
- [6] Marchenko B.G., Mislovich M.V. Diagnostika na tsilindro-butalnata grupa na dizel-elektricheski generator chrez neravnomerno vurtene na negoviya val: chast I. *Tekhnicheska elektrodinamika*. 1998. № 5. S. 36-40.
- [7] Pokusaev M. N., Sibiriyakov K. O., Shevchenko A. V. Eksperimentalno opredelyane na stepenta na neravnomerno vurtene na vala na mashinno-zadvizhvashtiya kompleks na koraba pr. 1557. *Vestnik ASTU*. 2008. № 2 (43). str. 140-144.
- [8] Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Nikitin A. V. Adaptivno upravlenie na zakhranvaneto s gorivo na dvigatelya s vutreshno gorene vuz osnova na pokazatelite za neravnomerno vurtene na kolyanoviya val. *Byuletin na SSTU*. 2013. № 2 (71). str. 80 - 83.

- [9] Bashirov R. M., Insafudinov S. Z., Safin F. R. Neravnomerno podavane na gorivo v dizelovi dvigateli: problemi i metodi za tyakhnoto reshavane. Izvestiya OGAU. 2019. № 1(75). str. 78-82.
- [10] Bodnar B.Ě., Ochkasov O.B., Chernyaev D.V. Prisyoyavane na metoda za filtrirane na signala za neravnomernata chestota na obvivane na kolyanoviya val na dizelov dvigatel // Byuletin na Dnepropetrovskiyatsionalen universitet po zhelezopūten transport. - 2013. - VIP. 1 (43). - S. 113 - 118.
- [11] Enikeev A. F., Borisenko A. N., Samsonov V. P., Kiseleva G. M. Diagnosis of a diesel generator by the deviation in shaft speed. Measurement techniques USSR. 1988. Volume: 31. Issue: 9. Pages: 868-871. DOI: 10.1007/BF00863884.
- [12] Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2019. No 4. Pp. 85-91. <http://dx.doi.org/10.15407/techned2019.04.085>
- [13] Ayasun S, Nwankpa C.O. *Transformer tests using MATLAB/Simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses*. Online ISSN:1099-0542 Wiley Periodicals, Inc. Comput Appl Eng Educ, Vol. 14, No.2, 2006, pp. 142–150. DOI 10.1002/cae.20077.
- [14] Yenikieiev O., Zakharenkov D., Gasanov M., Yevsyukova F., Naboka O., Ruzmetov A. Improving the Productivity of Information Technology for Processing Indirect Measurement Data. International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) – 2022. Pp 80–94. DOI: 10.1007/978-3-031-15944-2_8.
- [15] Bendat D., Pirsol A. Prilozheniya na korelatsionen i spektralnen analiz. Moskva: Mir, 1983. 312 s.

Єнікєєв Олександр Фанілович — д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Інтелектуальні системи прийняття рішень», e-mail: Al_enikeev@bigmir.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>

Захарєнков Дмитро Юрійович — аспірант кафедри «Теоретичні основи електротехніки», e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-022X>

O. F. Yenikieiev¹
D. Yu. Zakharenkov²

Algorithmical Provision of Fuel Supply Control Under the Conditions of Incomplete Information

¹Donbas State Mechanical Engineering Academy;

²National Technical University "KhPI"

An indirect method for assessing the identity of power unit operating cycles is proposed. The frequency-modulated signal of the speed of rotation of the crankshaft is chosen as a source of input information. With the use of nozzles that have piezoelectric control means, the conceptual principles of software movements of hardware devices to ensure the identity of work cycles have been developed. Direct digital control and feedback control methods are used to design the hardware architecture. The torque of an individual cylinder was approximated on the basis of the Fourier transform taking into account the sequence of their work. A mechanical system with four degrees of freedom is proposed as a deterministic mathematical model of the torque circuit of the power unit. The movements of the masses of the model are described by a system of differential equations, provided that friction is taken into account. The parameters of the system are normalized and the Laplace transform under zero initial conditions is used for its solution. The information links between the torques and the measurement information signal were established using the method of determinants and the theory of signal graphs. It was found that these methods give almost identical calculation results. Algorithmic support for assessing the identity of work cycles is built on the solution of a redefined system of algebraic equations with optimization of the result based on the method of least squares. The Monte Carlo method was used as a mathematical tool for the computer simulation of random disturbances. Computer modeling of the effects of interference on the measurement information signal and on the phase delays of individual cylinders established the requirements for the metrological characteristics of the hardware

Keywords: hardware, computer control system, algorithm support, measuring transducer, application software, frequency-modulated signal, uncertainty, speed.

Yenikieiev Oleksandr F. — Dr. Tech. Sciences, associate professor, head of the department "Intelligent decision-making systems", e-mail: Al_enikeev@bigmir.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>

Zakharenkov Dmitro Yu. — graduate student of the "Theoretical foundations of electrical engineering" department, e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-022X>;