

УДК 683.335.13

doi:10.20998/2413-4295.2022.01.01

## АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ІДЕНТИЧНОСТІ ЦИЛІНДРОВИХ ПОТУЖНОСТЕЙ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ НА ОСНОВІ ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

**А. М. БОРИСЕНКО<sup>1\*</sup>, О. Ф. ЄНІКЄЄВ<sup>2</sup>, Д. Ю. ЗАХАРЕНКОВ<sup>2</sup>, І. С. ЗИКОВ<sup>3</sup>,  
О. Ю. МЕЛЬНИКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кафедра теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, УКРАЇНА

<sup>3</sup> кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\* e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Запропоновано частотно-модульований сигнал миттєвої швидкості обертання колінчастого вала в якості вхідної інформації при моніторингу ідентичності циліндрових потужностей двигуна внутрішнього згоряння. Алгоритмічне забезпечення побудовано на розв'язанні перевизначеної системи лінійних алгебраїчних рівнянь із оптимізацією рішення на основі методу найменших квадратів. Досліджено частотний та часовий методи подання сигналу вимірювальної інформації. При часовому поданні система алгебраїчних рівнянь являє собою баланс між значеннями сигналу флуктуації першої маси у конкретні моменти часу та сумою розрахункових внесків циліндрів. Додаток до суми визначається добутком вагових коефіцієнтів на відповідну функцію внеску циліндру до сигналу флуктуації. Ця функція розраховується як інтервал згортки між крутним моментом окремого циліндра та його передавальною функцією. В результаті розв'язання системи рівнянь отримуємо вагові коефіцієнти циліндрів, за допомогою яких визначаємо розподіл циліндрових потужностей силового агрегату. При порівнянні методик встановлено, що часовий метод подання забезпечує кращу продуктивність. Розроблено математичний апарат отримання оцінки максимальної правдоподібності параметрів детермінованих складових внесків окремих циліндрів у сигнал флуктуації швидкості обертання першої маси колінчастого вала. Також пропонується алгоритм отримання оцінок вагових коефіцієнтів циліндрів, який реалізує кореляційний метод аналізу. Це забезпечує суттєве покращення співвідношення сигнал-завада у вимірювальній реалізації сигналу флуктуації швидкості обертання колінчастого вала. Отримано аналітичний вираз для взаємної кореляційної функції між часовою реалізацією сигналу флуктуації та крутним моментом першого циліндру. Розроблено схему алгоритму моніторингу ідентичності циліндрових потужностей силового агрегату. Досліджено невизначеність інформаційної технології опрацювання даних непрямих вимірювань та встановлено вимоги щодо метрологічних характеристик апаратних засобів для вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала.

**Ключові слова:** частотно-модульований сигнал; алгоритмічне та прикладне програмне забезпечення; продуктивність; комп'ютерне моделювання

## ALGORITHMIC PROVISION OF MONITORING OF IDENTITY OF CYLINDER POWERS OF POWER UNITS ON THE BASIS OF PROCESSING OF DIRECT INDIRECT DATA

**A. BORYSENKO<sup>1\*</sup>, O. YENIKIEIEV<sup>2</sup>, D. ZAKHARENKOV<sup>2</sup>, I. ZYKOV<sup>3</sup>, O. MELNYKOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of intelligent decision making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, UKRAINE

<sup>3</sup> Department of computer engineering and programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** A frequency-modulated instantaneous crankshaft speed signal is proposed as input information for monitoring the identity of the cylinder power of an internal combustion engine. Algorithmic software is based on solving a predefined system of linear algebraic equations with optimization of the solution based on the least-squares method. Frequency and time methods of signal measurement research are investigated. In the temporal representation, the system of algebraic equations is the balance between the values of the fluctuation signal of the first mass at specific points in time and the sum of the calculated contributions of the cylinders. The addition to the sum is determined by the product of the weights for the corresponding function of the contribution of the cylinder to the fluctuation signal. This function is calculated as the convolution interval between the torque of an individual cylinder and its transfer function. As a result of solving the system of equations, we obtain the weights of the cylinders, which are used to determine the distribution of cylinder power of the power unit. When comparing the methods, it was found that the time method of presentation provides better performance. A mathematical apparatus for estimating the maximum plausibility of the parameters of the determined components of the contributions of individual cylinders in the signal of fluctuations in the speed of rotation of the first mass of the crankshaft has been developed. An algorithm for estimating the weights of cylinders, which implements the correlation method of analysis, is also proposed. This provides a significant improvement in the signal-to-noise ratio in the measurement implementation of the signal of fluctuations in the speed of the crankshaft. An analytical expression for the cross-correlation function between the time realization of the fluctuation signal and the torque of the first cylinder is obtained. The scheme of the algorithm for monitoring of identity of cylindrical powers of the power unit is developed. The uncertainty of information

technology for processing indirect measurement data is investigated and the requirements for metrological characteristics of hardware for measuring the signal of the instantaneous crankshaft speed signal are established.

**Keywords:** frequency-modulated signal; algorithmic and application software; productivity; computer simulation

### Вступ

Техніко-економічні та екологічні показники дизель-генераторів (ДГ) залежать від ідентичності циліндрових потужностей [1-3]. Відомі методи й апаратні засоби не забезпечують потрібну вірогідність та невизначеність при встановленні коливань циліндрових потужностей. Організація комп'ютерною системою (КС) програмного керування процесами подачі паливо-повітряної суміші у циліндри забезпечить економію палива у 5% [4,5], зменшить ймовірність перевантаження деяких циліндрів силового агрегату, суттєво збільшить термін використання й скоротить витрати на профілактику, обслуговування та ремонт. Отже, вибір методу опрацювання вхідної інформації у вигляді частотно-модульованого сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого вала силового агрегату та на його основі розроблення алгоритмічного й прикладного програмного забезпечення із заданою продуктивністю є актуальною науково-прикладною задачею.

### Мета роботи

Зменшення невизначеності та підвищення продуктивності інформаційної технології моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ на основі опрацювання даних непрямих вимірювань.

### Виклад основного матеріалу

Найбільш відомим методом моніторингу циліндрових потужностей ДГ є вимірювання тиску циліндрів та подальша побудова індикаторних діаграм. Відсутність ідентичності встановлюється шляхом опрацювання значень максимального тиску циклу за серію робочих циклів [6]. Цей метод має такі недоліки:

- потрібне дороблення двигуна із метою встановлення давачів тиску;
- обмежені можливості для досліджень, оскільки відсутність ідентичності циліндрових потужностей можна встановити тільки у спеціально дороблених двигунах;
- недостатня об'єктивність вимірів тому, що кожен ДГ має індивідуальні характеристики робочих циклів;
- застосування ручної праці, достатньо велика кількість циліндрів та відсутність вихідних електричних сигналів у ПП тиску суттєво обмежують продуктивність цього методу оцінювання;
- для зменшення невизначеності вимірювань доцільно використати перетворювач типу E14-140 (системна плата L-783) із давачем тиску 8QP505CS та програмне забезпечення «Power Graph».

У дослідженні [7] розглянуто деякі питання побудови математичної моделі для встановлення закономірностей приросту у часі циліндрових потужностей силового агрегату. Обґрунтовано їхнє подання у вигляді періодично корельованих

випадкових процесів. Запропоновано методи побудови оцінок деяких параметрів вказаних процесів та доведена ефективність їхнього використання у якості діагностичних ознак технічного стану циліндро-поршневої групи дизеля. У роботі [8] наведено результати досліджень нерівномірності обертання вала ДГ 6NVD48UA. 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 [9] 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 [10] запропоновано методикою корегування параметрів циклової подачі палива, ідентичність якої встановлюється на основі опрацювання сигналу нерівномірності обертання колінчастого вала ДГ.

У публікації [11] на основі аналізу відомих методів опрацювання сигналів досліджено і обґрунтовано застосування методу виявлення структурних параметрів ДГ. Розглянуто вимірювальну експертну систему для встановлення інформативних параметрів сигналів, які дозволяють провести експертизу технічного стану силового агрегату. Виконано комп'ютерне моделювання впливу випадкових завод на інформативні параметри (кутове прискорення колінчастого вала та кут випередження подачі палива). Це дозволило сформулювати вимоги до найбільш ефективної структури вимірювальної експертної системи. Недоліком розглянутих методів оцінювання циліндрових потужностей є використання ручної праці, що суттєво зменшує їхню продуктивність.

При розробці алгоритмічного забезпечення обчислювальної процедури моніторингу циліндрових потужностей необхідно врахувати, що внески циліндрів у сигнал флуктуацій суттєво відрізняються за величиною [12,13]. Ця обставина накладає обмеження на невизначеність сигналу вимірювальної інформації.

Алгоритмічне забезпечення моніторингу циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 авторами побудовано на встановленні величин вагових коефіцієнтів  $D_i$  циліндрів. Для цього розв'язується система алгебраїчних рівнянь такого вигляду [14]

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

де  $B$  – матриця, коефіцієнти якої визначаються на основі передавальних функцій та крутних моментів циліндрів в залежності від обраного методу розрахунку;  $D$  – вектор-стовпець вагових коефіцієнтів циліндрів;  $\varphi_1$  – вектор-стовпець сигналу флуктуацій першої маси;

$\varphi_{1,0}$  – вектор-стовпець сигналу флуктуацій першої маси, за відсутності подачі палива у циліндри.

Кількість рівнянь у системі (1) визначається збіжністю отриманих рішень при досягненні заданої невизначеності розрахунку вагових коефіцієнтів  $D_i$  із урахуванням дії випадкових завад на сигнал вимірювальної інформації. Кількість інтервалів дискретизації сигналу флуктуацій першої маси обираємо на основі теореми Котельникова.

При часовому поданні вимірювальної інформації система алгебраїчних рівнянь (1) є баланс між значеннями сигналу флуктуацій першої маси у конкретні моменти часу  $t_j$  та відповідною сумою розрахункових внесків кожного циліндру. Додаток до суми визначається добутком коефіцієнтів  $D_i$  на відповідну вагову функцію внеску циліндру до сигналу флуктуацій. Ця функція розраховується заздалегідь як інтервал згортки між крутним моментом окремого циліндра та відповідною передавальною функцією. При цьому алгоритмічне забезпечення моніторингу циліндрових потужностей силового агрегату реалізує наступні обчислювальні процедури:

- розраховуємо коефіцієнти лівої частини системи рівнянь (1) за допомогою співвідношення

$$b_{i,j} = \int_0^{t_j} W_i(t-\tau)M_i(\tau)d\tau; \quad (2)$$

- у результаті дослідів визначаються значення сигналу флуктуацій в конкретні моменти часу  $t_j$ . Крок дискретизації за часом обирається на підставі заданої невизначеності розрахунку  $D_i$ . При цьому враховується обмеження на обсяг вибірки та продуктивність розрахунків;

- розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (1) доцільно провести із використанням методу найменших квадратів для оптимальних значень вагових коефіцієнтів  $D_i$ . Остаточо розглядається такий набір вагових коефіцієнтів  $D_i$ , при якому середнє квадратичне відхилення вільних членів системи від значень її правих частин буде мінімальним. У процесі налаштування алгоритму розрахунку вагових коефіцієнтів  $D_i$  використано підпрограму LLSQ стандартного математичного забезпечення;

- на підставі вагових коефіцієнтів робиться висновок про ідентичність циліндрових потужностей.

При частотному поданні сигналу флуктуацій система алгебраїчних рівнянь (1) являє собою баланс комплексних амплітуд гармонійних складових. Розраховуються частотне подання усіх добутків вагових коефіцієнтів  $D_i$  на внесок відповідного циліндра  $b_i(jn\omega)$  до сигналу флуктуацій першої маси колінчастого валу. Потім шляхом підсумовувань встановлюються коефіцієнти матриці  $B$ . Таким чином, отримуємо частотне подання системи (1).

Алгоритмічне забезпечення при моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 реалізує наступні обчислювальні процедури:

- обчислюються комплексні коефіцієнти передач від кожного з циліндрів до маси колінчастого вала, біля якої встановлено давач. При цьому вирази передавальних функцій  $W_i(n\omega)$  у відповідному діапазоні швидкості обертання колінчастого валу;

- комплексні коефіцієнти передач помножуються на дискретний частотний спектр крутних моментів циліндрів  $i$ , таким чином, формується матриця коефіцієнтів лівої частини рівнянь

$$b_i(jn\omega) = W_i(jn\omega)M_i(jn\omega); \quad (3)$$

- сигнал вимірювальної інформації  $\varphi_1(jn\omega)$  подається обмеженим рядом Фур'є;

- розв'язується детермінована система алгебраїчних рівнянь (1).

Алгоритмічне забезпечення, яке розроблено на базі частотного та часового методів, має однакову продуктивність та невизначеність обчислень. Однак, обсяг обчислень при часовому методі виходить трохи більше через багаторазове визначення інтеграла згортки, ніж при частотному методі, де потрібно отримати частотний спектр сигналу вимірювальної інформації.

Джерелами випадкових завад, які впливають на невизначеність процедури моніторингу ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1, є:

- технологічна невизначеність виготовлення колінчастих валів, яка знаходить свій прояв у зміні фазових запізнь між крутними моментами окремих циліндрів та першим;

- часова нестабільність процесів згоряння палива в циліндрах;

- випадкові завади апаратних засобів.

Будемо вважати, що обидві ці складові мають адитивний характер. Відмінність між ними полягає в тому, що перша та друга невизначеності діють на вході системи, а третя на виході. Пропонується така методика приведення випадкових завад зі входу компоненту до його виходу [15]:

- задаємося законом розподілу вхідної випадкової завади;

- розраховуємо кореляційні функції

$$R(\tau) = \int \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 \eta(x_1, x_2, t, t + \tau) dx_1 dx_2, \quad (4)$$

де  $\eta(x_1, x_2, t, t + \tau)$  – спільна щільність розподілу ймовірності двох випадкових величин;

- спектральна щільність випадкової завади визначається згідно до теореми Вінера-Хинчина

$$W_{\text{вх}}(n\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j2\pi n\omega\tau} d\tau; \quad (5)$$

- спектральна щільність випадкової завади дорівнює

$$\varpi_{\text{вх}}(n\omega) = |W(n\omega)|^2 \omega_M(n\omega). \quad (6)$$

• кореляційна функція завади визначається відповідно до теореми Вінера-Хинчина

$$R_{\text{вих}}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_{\text{вих}}(n\omega) e^{-jn\omega\tau} d(n\omega). \quad (7)$$

Таким чином, спектральна щільність випадкової завади на виході, з урахуванням двох її складових, подається таким виразом

$$\varpi_{\text{вих}}(n\omega) = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 W_i(jn\omega) W_k(jn\omega) \varpi_{i,k}(n\omega) + \varpi_n(n\omega), \quad (8)$$

де  $\varpi_n(n\omega)$  – спектральна щільність випадкової завади пристрою для вимірювань.

Отриманий вираз містить декілька додатків. Якщо випадкові завади розкиду параметрів процесів згоряння палива не корельовано із завадами апаратних засобів, то спектральна щільність завади на виході дорівнює

$$\varpi_{\text{вих}}(n\omega) = \sum_{i=1}^3 W_i^2(n\omega) \varpi_i(n\omega) + \varpi_n(n\omega). \quad (9)$$

Таким чином, остаточний вираз для спектральної щільності випадкової завади на виході системи з урахуванням того, що між сумами вхідних сигналів існує кореляційний зв'язок, вишло наступним

$$\varpi_{\text{вих}}(n\omega) = \sum_{k=1}^3 W_k(n\omega) W_k(n\omega) \varpi_{1,k}(n\omega) + \varpi_n(n\omega). \quad (10)$$

На сигнал вимірювальної інформації впливають випадкові завади, які обумовлено обмеженою чутливістю апаратних засобів. Ця невизначеність має адитивний характер і формує смугу нечутливості навколо номінальної характеристики перетворення пристрою для вимірювань. Відповідно сигнал флуктуацій швидкості обертання валу ДГ ЗТД-1 подаємо у вигляді суми детермінованого процесу, який містить три складові (за кількістю циліндрів) з невідомими амплітудами, та випадкового процесу (завада) із нульовим середнім і відомою кореляційною функцією. Для даного виду реалізації випадкового процесу пропонується математичний апарат отримання оцінки максимальної правдоподібності параметрів детермінованих складових. Він зводиться до розв'язування системи алгебраїчних рівнянь (1), у якій елементи вектора-стовпця визначаються за допомогою такого виразу

$$\varphi_{1,k} = \int_{-T}^T V_k(t) \varphi_1(t) dt, \quad (11)$$

де  $V_k(t)$  – рішення неоднорідного інтегрального рівняння

$$\int_{-T}^T R(t, \tau) V_k(t) d\tau = y_i(t), \quad (12)$$

де позначено:  $R(t, \tau)$  – кореляційна функція випадкової завади,  $S_T$  – матриця розміром  $m \times m$  (де

$m$  – кількість детермінованих складових), елементи якої визначаються наступним чином

$$S_{T,K} = \int_{-T}^T V_K(t) y_i(t) dt. \quad (13)$$

Таким чином, процедура опрацювання вимірюваної реалізації випадкового процесу із метою отримання оцінок максимальної правдоподібності детермінованих складових полягає в наступному:

• вимірювана реалізація  $\varphi_1(t)$  інтегрується із ваговою функцією  $V_K(t)$  на інтервалі  $(-T, T)$  та отримуємо вектор-стовпець оцінок сигналу флуктуацій  $\varphi_T$ ;

• вагову функцію  $V_K(t)$  отримуємо у результаті розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма першого роду методом кінцевих сум. Обчислення вагової функції виконується до вимірювань сигналу флуктуацій першої маси  $\varphi_1(t)$ ;

• детерміновані складові  $y_i(t)$  інтегруються із ваговою функцією  $V_K(t)$  на інтервалі  $(-T, T)$  та формується матриця  $S_T$  розміром  $m \times m$ . Ця операція виконується до отримання часової реалізації сигналу флуктуацій;

• система алгебраїчних рівнянь (1) вирішується одним із чисельних методів та отримуємо оцінки максимальної правдоподібності амплітуд детермінованих складових. Для перевірки алгоритму використано стандартну підпрограма "LLSQ" із бібліотеки математичного забезпечення ЕС EOM;

• отримано оцінки максимальної правдоподібності амплітуд детермінованих складових, які стійкі до впливу випадкових завад і є спільно ефективними.

Проведено числове моделювання процедури отримання оцінок максимальної правдоподібності амплітуд детермінованих складових крутного моменту. При цьому використовувалися різні інтервали невизначеності вектору-стовпця  $\varphi_T$ . Невизначеність амплітуди крутного моменту, який створює на колінчастому валу ДГ ЗТД-1 третій циліндр, при використанні даного алгоритму зменшується з 18,7% до 3,3% при дисперсії завади сигналу флуктуацій на рівні 1%. Отже, методика дозволяє поліпшити завадостійкість часового методу моніторингу циліндрових потужностей силового агрегату.

У розвиток цього підходу, що є балансом між середніми значеннями (постійними складовими) добутків відповідних функцій вигляду  $\varphi_1(t) V_K(t)$  та  $y_i(t) V_K(t)$ , можна запропонувати оцінювання балансу їхніх гармонійних складових. Це може привести до урахування рівності більш тонкої структури, якими є окремі спектральні складові.

При поданні детермінованих процесів сумою гармонійних складових із невідомої амплітудою

система алгебраїчних рівнянь (1) записується окремо для дійсної та уявної частини. Кількість рівнянь в цих системах визначається числом детермінованих складових, а також кількістю спектральних ліній в їхньому дискретному частотному спектрі. Тому система алгебраїчних рівнянь для отримання оцінок максимальної правдоподібності амплітуд детермінованих складових є перевизначеною та її рішення принципово може бути оптимізовано. Для виконання цієї процедури зручно використати відомий метод найменших квадратів. Процедура опрацювання реалізації сигналу флукуацій швидкості обертання першої маси колінчастого валу силового агрегату із метою отримання оцінок максимальної правдоподібності амплітуд детермінованих складових аналогічна.

Оцінювання величини вагових коефіцієнтів  $D_i$  при відомій фазі детермінованого додатку у вигляді сигналу флукуацій швидкості обертання першої маси колінчастого валу силового агрегату виходить при розв'язуванні системи алгебраїчних рівнянь (1), яку записано для дійсної або для уявної частин. Якщо параметрами детермінованих процесів є амплітуда та фаза, то для отримання оцінок максимальної правдоподібності доцільно розв'язувати ці системи рівнянь спільно. Параметри визначаються наступним чином

$$D_i = \sqrt{(D_i')^2 + (D_i'')^2}, \quad \gamma_i = \arccos \frac{D_i'}{\sqrt{(D_i')^2 + (D_i'')^2}}, \quad (14)$$

де  $D_i'$ ,  $D_i''$  – оцінки отримано при розв'язанні системи рівнянь (1), яку записано для дійсної та для уявної частин.

Пропонується алгоритм отримання оцінок вагових коефіцієнтів  $D_i$ , який розробляється на основі кореляційного методу аналізу. Цей метод забезпечує суттєве покращення співвідношення сигнал-завада у вимірній реалізації флукуацій швидкості обертання колінчастого валу. Аналітичний вираз для взаємної кореляційної функції між часовою реалізацією флукуацій швидкості обертання першої маси  $\varphi_1(t)$  та реакцією  $y_1(t)$  на крутний момент відповідного циліндру отримано в наступному вигляді

$$R_1(\tau) = \sum_{i=1}^3 D_i R_{2,i}(\tau) + R_{1,1}(\tau), \quad (15)$$

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

Будемо вважати, що випадкова завада  $\Pi(t)$  й реакція  $y_1(t)$  від першого циліндра не корельовано, тобто  $R_{1,1}(\tau) = 0$ . Тоді аналітичний вираз для взаємної кореляційної функції сигналу флукуацій і реакції від першого циліндра приймає такий вигляд

$$R_1(\tau) = \sum_{i=1}^3 D_i R_{2,i}(\tau). \quad (16)$$

Звідси виходить наступна система алгебраїчних рівнянь в матричній формі запису

$$DR_2 = R_1, \quad (17)$$

де  $R_1$  – вектор-стовпець оцінок сумарного сигналу, елементи якого отримуються за допомогою виразу

$$R_{1,K} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \varphi_1^*(t) y_K(t - \tau) dt, \quad (18)$$

де  $R_2$  – кореляційна матриця, елементи якої описуються наступним виразом

$$R_{2,i,K} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y_i(t) y_K(t - \tau) dt. \quad (19)$$

Якщо у виразах (18) та (19) покласти  $\tau = 0$ , то система алгебраїчних рівнянь (17) перетворюється в систему рівнянь максимальної правдоподібності. При цьому випадкова завада являє собою білий шум і крутний момент відповідного циліндра використовується в якості вагової функції  $y_K(t)$ . Отже, процедура опрацювання сигналу флукуацій із метою отримання вагових коефіцієнтів  $D_i$  полягає в наступному:

- сигнал флукуацій  $\varphi_1(t)$  інтегрується із ваговою функцією  $y_K(t)$  та отримуємо вектор-стовпець оцінок вхідного впливу  $R_1$ ;
- детерміновані складові  $y_i(t)$  інтегруються із ваговою функцією  $y_K(t)$  та отримуємо матрицю  $R_2$ . Цю операцію можна виконати заздалегідь, тобто до отримання часової реалізації  $\varphi_1^*(t)$ ;
- система алгебраїчних рівнянь (17) вирішується одним із чисельних методів та маємо вагові коефіцієнти  $D_i$ .

Таким чином, алгоритм отримання оцінок максимальної правдоподібності параметрів детермінованих складових є окремим випадком алгоритму отримання коефіцієнтів на базі кореляційного аналізу. Процедура опрацювання реалізації сигналу флукуацій спрощується при використанні в якості функції  $V_K(t)$  реакції на вхідний вплив обраного циліндра. Краще використовувати реакцію  $y_i(t)$  на вхідний вплив першого циліндра, так як вона має найбільшу вагу в сумарному сигналі флукуацій. Відповідно, потрібна кількість рівнянь для розв'язування системи (17) виходить за рахунок раціонального вибору  $\tau$ . Якщо взяти  $\tau$  достатньо малим, то система рівнянь (17) буде перевизначеною й для оптимізації її рішення можна використати метод найменших квадратів.

Схему алгоритму моніторингу апаратними засобами КС ідентичності циліндрових потужностей силового агрегату подано на рис. 1.

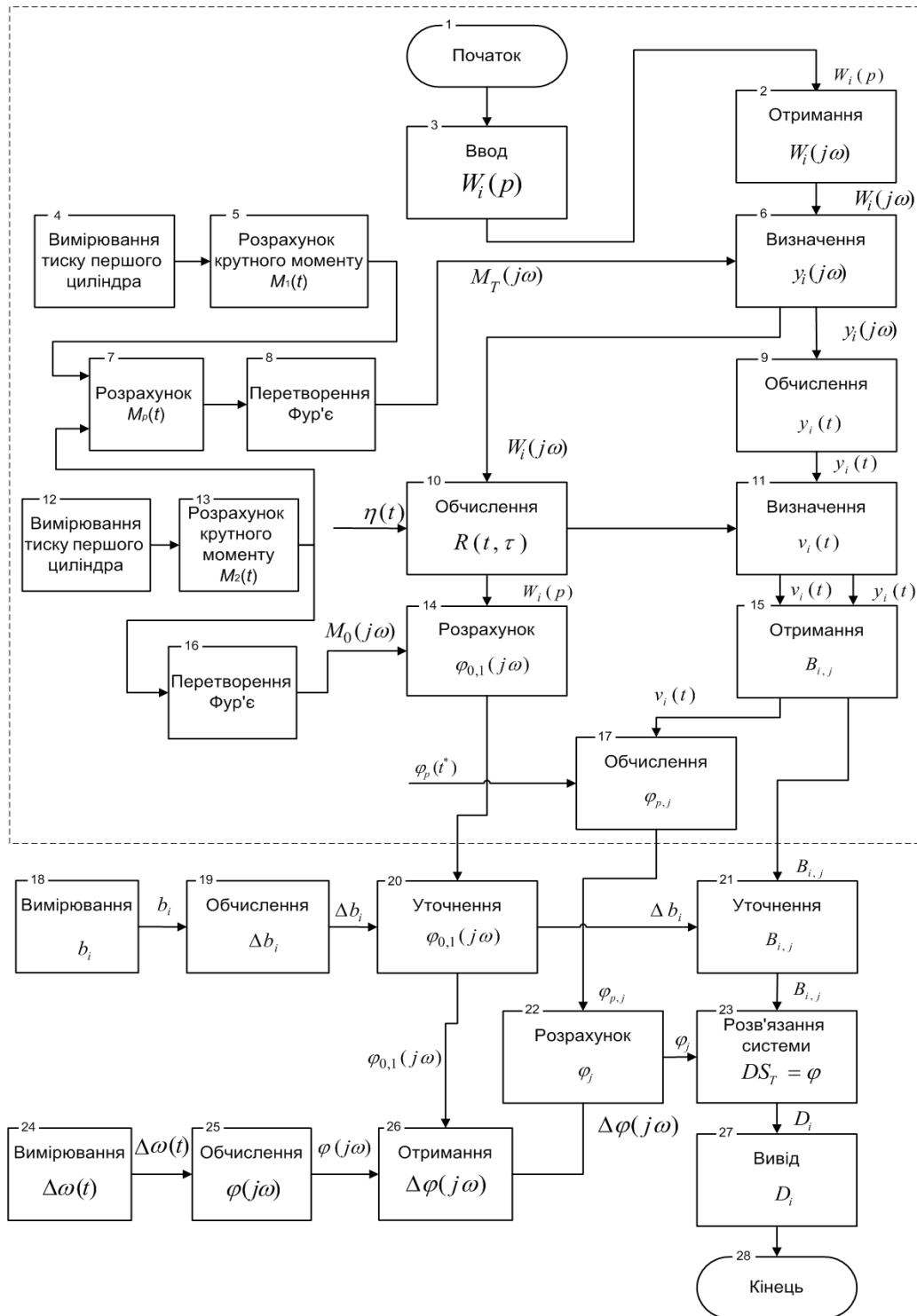


Рис. 1 – Схема алгоритму моніторингу циліндрових потужностей силового агрегату

На рис. 1 позначено таке:  $M_0(j\omega)$  – крутний момент за відсутності подачі паливо-повітряної суміші до циліндру,  $M_T(j\omega)$  – частотне подання різницевого крутного моменту,  $b_i$  – фазові запізнення циліндрів відносно першого,  $\phi_p(t)$  – розрахункове значення сигналу флуктуацій швидкості обертання першої маси колінчастого валу за відсутності подачі

палива до циліндрів. Обчислювальні процедури, які обведено штриховою лінією, виконуються до отримання часової реалізації сигналу вимірювальної інформації.

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

$$\begin{aligned} R_{M,\varphi}(0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_1(t_i) \varphi_1(t_i); \\ R_{M,\varphi}(1) &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} M_1(t_{i+1}) \varphi_1(t_i); \\ &\vdots \\ R_{M,\varphi}(N-1) &= M_1(t_{N-1}) \varphi_1(t_1). \end{aligned} \quad (20)$$

Інформаційна технологія опрацювання результатів обчислень складає наступні дії:

- визначаємо середнє значення дійсної та уявної частин комплексів вагових коефіцієнтів циліндрів  $D_i$ ;

- розраховуємо абсолютне та відносне значення невизначеностей розрахунку коефіцієнтів;

- за допомогою програмного середовища Mathcad будемо графіки невизначеностей.

Графіки (рис. 2) побудовано за допомогою програмного середовища Mathcad на основі використання схеми Ламера при комп'ютерній імітації адитивної випадкової завади та подання системи алгебраїчних рівнянь (17)

$$BD = \varphi_1 + \delta_4(t), \quad (21)$$

де  $\delta_4(t)$  – випадкова завада.

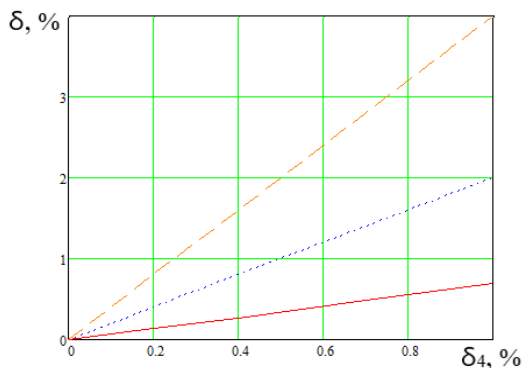


Рис. 2 – Графіки невизначеності розрахунку коефіцієнтів ( $D_1$  - безперервний,  $D_2$  - точковий,  $D_3$  - штриховий)

### Обговорення результатів

Опрацювання сигналу швидкості обертання першої маси колінчастого валу силового агрегату з метою оцінювання ідентичності циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1 побудовано на використанні часового та частотного методів подання. Встановлено, що їхнє використання забезпечує достатньо близьку продуктивність розрахунків. Однак, за умови дії на сигнал вимірювальної інформації випадкових завад перевагу слід надати алгоритму отримання оцінок максимальної правдоподібності вагових коефіцієнтів циліндрів.

### Висновки

Алгоритмічне забезпечення обчислювальної процедури моніторингу ідентичності циліндрових

потужностей ДГ ЗТД-1 за умови дії випадкових завад на сигнал вимірювальної інформації використовує алгоритм отримання оцінок максимальної правдоподібності вагових коефіцієнтів циліндрів. Проведено комп'ютерне моделювання процедури встановлення вагових коефіцієнтів циліндрів за умови дії випадкових завад на коефіцієнти системи алгебраїчних рівнянь. Розроблено алгоритмічне та прикладне програмне забезпечення при комп'ютерній імітації випадкових завад за схемою Ламера. Отримано графік невизначеності розрахунку вагових коефіцієнтів циліндрових потужностей ДГ ЗТД-1. В результаті їхнього аналізування встановлено вимоги щодо метрологічних характеристик апаратних засобів для вимірювань сигналу миттєвої швидкості обертання колінчастого валу.

### Список літератури

1. Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. 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). P. 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. P. 782–787.
4. Боднар Б. С., 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.
5. Грачев В. В. Экспериментальная оценка метода диагностирования дизельных двигателей по неравномерности вращения коленчатого вала. *Прогрессивные процессы технологической эксплуатации автомобилей. МАДИ*. 1982. С. 46–50.
6. Стечкин Б. С., Генкин К. И., Золотаревский В. С., Скородинский И. В. *Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя*. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 200 с.
7. Марченко Б. Г., Мыслович М. В. Диагностика цилиндропоршневой группы дизель-электрического генератора по неравномерности вращения его вала: часть 1. *Техническая электродинамика*. 1998. № 5. С. 36–40.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. Добролюбов И. П., Савченко О. Ф., Альт В. В., Ольшевский С. Н., Клименко Д. Н. Моделирование процесса оптимального определения параметров состояния двигателя внутреннего сгорания измерительной экспертной системой. *Вычислительные технологии*. 2015. Т. 20. № 6. С. 22–35.
12. 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. Vol. 31. Iss.9. P. 868–871. doi: 10.1007/BF00863884.
13. Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*. 2020. Vol. 63. Iss. 11. P. 149–158.
14. Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No. 4. P. 85–91. doi: 10.15407/techned2019.04.085
15. Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley: Prentice Hall. 2010. 1104 p.
- тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Indicator diagram, heat dissipation dynamics and duty cycle of a high-speed piston engine]. *M. Izd-vo Akademii nauk SSSR*, 1960. 200 p.
7. Marchenko B. G., Myslovich M. V. Diagnostika tsilindroporshnevoy grupy dizel'-elektricheskogo generatora po neravnomernosti vrashcheniya yego vala: chast' 1 [Diagnostics of the cylinder-piston group of a diesel-electric generator by uneven rotation of its shaft: part 1], *Tekhnicheskaya elektrodinamika [Technical electro-dynamics]*, 1998, no. 5, pp. 36–40.
8. Pokusayev M. N., Sibiryakov K. O., Shevchenko A. V. Eksperimental'noye opredeleniye stepeni neravnomernosti vrashcheniya vala mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna pr. 1557 [Experimental determination of the degree of uneven rotation of the shaft of the engine-propulsion complex of the vessel pr. 1557], *Vestnik AGTU*, 2008, no. 2 (43), pp. 140–144.
9. Grebennikov S. A., Grebennikov A. S., Nikitin A. V. Adaptivnoye upravleniye toplivopodachey DVS po pokazatelyam neravnomernosti vrashcheniya kolenchatogo vala [Adaptive control of ICE fuel supply by uneven rotation of the crankshaft], *Vestnik SGTU*. 2013, no. 2 (71), pp. 80–83.
10. Bashirov R. M., Insafuddinov S. Z., Safin F. R. Neravnomernost' toplivopodachi v dizelyakh: problemy i metody ikh resheniya [Uneven fuel supply in diesel engines: problems and methods of their solution], *Izvestiya OGAU*, 2019, no. 1 (75), pp. 78–82.
11. Dobrolyubov I. P., Savchenko O. F., Alt V. V., Ol'shevskiy S. N., Klimenko D. N. Modelirovaniye protsessa optimal'nogo opredeleniya parametrov sostoyaniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya izmeritel'noy ekspertnoy sistemoy [Simulation of the process of optimal determination of the parameters of the state of the internal combustion engine by the measuring expert system], *Vychislitel'nyye tekhnologii [Computing]*, 2015, Vol. 20, no. 6, pp. 22–35.
12. 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, Vol. 31, Iss. 9, pp. 868–871, doi: 10.1007/BF00863884.
13. Yenikieiev O., Isikova N., Korotenko Ye., Reshetnyak T. Analysis of characteristics of hardware means for software control of the longitudinal feed of the grinding wheel. *Acta Technica Naposensis*, 2020, Vol. 63. Iss. 11, pp. 149–158.
14. Yenikieiev O., Scherbak L. Information technology for protecting diesel-electric station reliable operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2019, no. 4, pp. 85–91. doi: 10.15407/techned2019.04.085.
15. Dorf R., Bishop R. *Modern Control Systems*. Addison: Wesley. Prentice Hall, 2010. 1104 p.

#### References (transliterated)

1. Challen B., Baranescu R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. 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. Bodnar B. Ye., Ochkasov O. B., Chernyayev D. V. Vyznachennya metodu fil'tratsiyi syhnalu nerivnomirnosti chastoty obertannya kolinchatoho valu dyzelya [Determination of the method of filtration of the signal of uneven speed of the crankshaft of diesel]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2013, Iss. 1(43), pp. 113–118.
5. Grachev V. V. Eksperimental'naya otsenka metoda diagnostirovaniya dizel'nykh dvigateley po neravnomernosti vrashcheniya kolenchatogo vala [Experimental evaluation of the method of diagnosing diesel engines by uneven rotation of the crankshaft]. *Progressivnyye protsessy tekhnologicheskoy ekspluatatsii avtomobiley. MADI*, M. 1982, pp. 46–50.
6. Stechkin B. S., Genkin K. I., Zolotarevskiy V. S., Skorodinskiy I. V. Indikatornaya diagramma, dinamika

#### Відомості про авторів (About authors)

**Борисенко Анатолій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**Borysenko Anatoliy** – Doctor of technical sciences, professor, Department of theoretical foundations of electrical engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-002-9160-4488; e-mail: an.borisenko.khpi@gmail.com

**Єнікєєв Олександр Фанілович** – доктор технічних наук, доцент, кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: AI\_enikeev@bigmir.net

**Yenikieiev Oleksandr** – Doctor of technical sciences, Docent, Department of intelligent decision-making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8633-3233; e-mail: AI\_enikeev@bigmir.net



**Захаренков Дмитро Юрійович** – кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

**Zakharenkov Dmitry** – Department of intelligent decision-making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3951-022X; e-mail: Dmit.zakharen@gmail.com

**Зиков Ігор Семенович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zykov@gmail.com

**Zykov Ihor** – Candidate of technical sciences, Associate professor, Department of computer engineering and programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8884-2715; e-mail: i.s.zykov@gmail.com

**Мельников Олександр Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна; ORCID: 0000-0003-2701-8051; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua

**Melnykov Olexsandr** – Candidate of technical sciences, Associate professor, Department of intelligent decision-making systems, Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2701-8051; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Борисенко А. М., Єнікеєв О. Ф., Захаренков Д. Ю., Зиков І. С., Мельников О. Ю. Алгоритмічне забезпечення моніторингу ідентичності циліндрових потужностей силових агрегатів на основі опрацювання даних непрямих вимірювань. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 1 (11). С. 3-11. doi:10.20998/2413-4295.2022.01.01.

*Please cite this article as:*

Borysenko A., Yenikieiev O., Zakharenkov D., Zykov I., Melnykov O. Algorithmic provision of monitoring of identity of cylinder powers of power units on the basis of processing of direct indirect data. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 1 (11), pp. 3-11, doi:10.20998/2413-4295.2022.01.01.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Борисенко А. Н., Еникеев А. Ф., Захаренков Д. Ю., Зыков И. С., Мельников О. Ю. Алгоритмическое обеспечение мониторинга идентичности цилиндрических мощностей силовых агрегатов на основе обработки данных косвенных измерений. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2022. № 1 (11). С. 3-11. doi:10.20998/2413-4295.2022.01.01.

**АННОТАЦИЯ** Предложен частотно-модулированный сигнал мгновенной скорости вращения коленчатого вала в качестве входной информации при мониторинге идентичности цилиндрических мощностей двигателя внутреннего сгорания. Алгоритмическое обеспечение построено на решении переопределенной системы линейных уравнений алгебраических с оптимизацией решения на основе метода наименьших квадратов. Исследованы частотный и временной методы представления сигнала измерительной информации. При временном представлении алгебраическая система уравнений представляет собой баланс между значениями сигнала флуктуаций первой массы в конкретные моменты времени и суммой расчетных взносов цилиндров. Приложение к сумме определяется произведением весовых коэффициентов на соответствующую функцию вклада цилиндра в сигнал флуктуаций. Эта функция рассчитывается как интервал свертки между крутящим моментом отдельного цилиндра и его передающей функцией. В результате решения системы уравнений получим весовые коэффициенты цилиндров, с помощью которых определяем распределение цилиндрических мощностей силового агрегата. При сравнении методик установлено, что временный метод представления обеспечивает лучшую производительность. Разработан математический аппарат для получения оценки максимального правдоподобия параметров детерминированных составляющих вкладов отдельных цилиндров в сигнал флуктуаций скорости вращения первой массы коленчатого вала. Также предлагается алгоритм получения оценок весовых коэффициентов цилиндров, реализующий корреляционный метод анализа. Это обеспечивает существенное улучшение соотношения сигнал-помеха в измерительной реализации сигнала флуктуаций скорости вращения коленчатого вала. Получено аналитическое выражение для корреляционной взаимной функции между временной реализацией сигнала флуктуаций и крутящим моментом первого цилиндра. Разработана схема алгоритма для мониторинга идентичности цилиндрических мощностей силового агрегата. Исследована неопределенность информационной технологии обработки данных косвенных измерений и установлены требования к метрологическим характеристикам аппаратных средств для измерений сигнала мгновенной скорости вращения коленчатого вала.

**Ключевые слова:** частотно-модулированный сигнал; алгоритмическое и прикладное программное обеспечение; производительность; компьютерное моделирование

Надійшла (received) 08.01.2022