

Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. РЕБРОВ, О. Ю. КРОПАЧЕК

КОНТРОЛЬ СТАНУ ВУЗЛІВ ДИНАМІЧНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В даній статті розглянута можливість здійснення контролю стану вузлів складного динамічного промислового об'єкту за рахунок використання безрозбірних технологій. В якості базового промислового об'єкту обрана паливна система дизель-генераторної установки, основним елементом якої є форсунка. Базовим параметром для відслідковування стану промислового об'єкту є механічна вібрація. Вимірювальний канал з п'єзоелектричним датчиком отримує вимірювальний сигнал, нормує його характеристики і переводить в цифрову форму. Отримана дискретна реалізація є часовою реалізацією, для аналізу такої реалізації здійснюється спектральне перетворення вимірювального сигналу. В статті досліджені основні методи спектрального перетворення: перетворення Фур'є, віконне перетворення Фур'є, неперервне вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення. Були проаналізовані переваги і недоліки кожного методу і обраний базовий для подальших досліджень. Для здійснення контролю стану вузлів складного промислового динамічного об'єкту в режимі реального часу запроваджується дискретне вейвлет перетворення з використанням вейвлету Хаара. Вейвлет Хаара дозволяє виконати автоматизацію алгоритму спектрального перетворення із залученням електронного діагностичного блоку з мінімальними характеристиками по об'єму пам'яті і швидкодії. Розкладення вимірювального сигналу механічної вібрації дозволяє представити цей сигнал в різних частотах і виділити корисний сигнал, постійну складову, низькочастотний тренд і шумову складову сигналу. Корисний сигнал досліджений на предмет близькості в просторі інформаційних ознак по відстані d паливної системи з робочими форсунками і із заданими несправностями. Це дозволило розробити і реалізувати на практиці алгоритм контролю стану форсунок дизель-генераторної установки в режимі реального часу.

Ключові слова: спектральне перетворення, вейвлет перетворення, вейвлет Хаара, вібросигнали, віброконтроль, паливна система, форсунка, дизель-генераторна установка, механічна вібрація.

Р. П. МИГУЩЕНКО, А. Ю. РЕБРОВ, О. Ю. КРОПАЧЕК

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЙ УЗЛОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной статье рассмотрена возможность осуществления контроля состояния узлов сложного динамического промышленного объекта за счет использования безразборной технологии. В качестве базового промышленного объекта выбрана топливная система дизель-генераторной установки, основным элементом которой является форсунка. Базовым параметром для отслеживания состояния промышленного объекта является механическая вибрация. Измерительный канал с пьезоэлектрическим датчиком получает измерительный сигнал, нормирует его характеристики и переводит в цифровую форму. Полученная дискретная реализация является временной реализацией, для анализа такой реализации осуществляется спектральное преобразование измерительного сигнала. В статье исследованы основные методы спектрального преобразования: преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье, непрерывное вейвлет преобразование, дискретное вейвлет преобразование. Были проанализированы преимущества и недостатки каждого метода и выбран базовый для дальнейших исследований. Для осуществления контроля состояния узлов сложного промышленного динамического объекта в режиме реального времени вводится дискретное вейвлет преобразование с использованием вейвлета Хаара. Вейвлет Хаара позволяет выполнить автоматизацию алгоритма спектрального преобразования с привлечением электронного диагностического блока с минимальными характеристиками по объему памяти и быстродействию. Разложение измерительного сигнала механической вибрации позволяет представить этот сигнал в различных частотах и выделить полезный сигнал, постоянную составляющую, низкочастотный тренд и шумовую составляющую сигнала. Полезный сигнал исследован на предмет близости в пространстве информационных признаков по расстоянию d топливной системы с рабочими форсунками и с заданными неисправностями. Это позволило разработать и реализовать на практике алгоритм контроля состояния форсунок дизель-генераторной установки в режиме реального времени.

Ключевые слова: спектральное преобразование, вейвлет преобразование, вейвлет Хаара, вибросигналы, виброконтроль, топливная система, форсунка, дизель-генераторная установка, механическая вибрация.

R. MYGUSHCHENKO, O. REBROV, O. KROPACHEK

MONITORING THE STATES OF NODES OF DYNAMIC INDUSTRIAL FACILITIES

This article discusses the possibility of monitoring the state of the nodes of a complex dynamic industrial facility through the use of disassembled technologies. The fuel system of the diesel generator set, the main element of which is the injector, was chosen as the basic industrial object. The basic parameter for monitoring the condition of an industrial facility is mechanical vibration. The measuring channel with the piezoelectric sensor receives a measuring signal, normalizes its characteristics and translates it into a digital form. The obtained discrete implementation is a temporal implementation, for the analysis of such implementation the spectral transformation of the measuring signal is carried out. The main methods of spectral transformation are investigated in the article: Fourier transform, window Fourier transform, continuous wavelet transform, discrete transformation. The advantages and disadvantages of each method were analyzed and the basic one was chosen for further research. To monitor the state of the nodes of a complex industrial dynamic object in real time, a discrete wavelet transform using the Haar wavelet is introduced. Haar's wavelet allows automation of the spectral transformation algorithm with the involvement of an electronic diagnostic unit with minimal characteristics in terms of memory and speed. Decomposition of the measuring signal of mechanical vibration allows to present this signal in different frequencies and to allocate a useful signal, a constant component, a low-frequency trend and a noise component of a signal. The useful signal is investigated for the proximity in the space of information signs on the distance d of the fuel system with working injectors and with the specified faults. This allowed to develop and implement in practice an algorithm for monitoring the state of the injectors of the diesel generator set in real time.

Keywords: spectral transform, wavelet transform, Haar wavelet, vibration signals, vibration control fuel system, injector, diesel generator set, mechanical vibration.

Постановка проблеми. Сучасне складне промислове обладнання потребує не менш сучасних методів і засобів контролю та діагностування його вузлів. Найбільш цікавими методами таких операцій бачаться методи неруйнівного контролю та

безрозбірних технологій.

Важливим параметром при контролі стану вузлів промислового обладнання є механічна вібрація. Близько 50 % обладнання, при своїй роботі, генерує вібраційні процеси, близько 90 % працює в умовах

© Р. П. Мигущенко, О. Ю. Ребров, О. Ю. Кропачек, 2021

підвищеної вібрації.

В даний час віброконтроль є важливою методикою при визначенні несправностей у вузлах промислових агрегатів. Механічна вібрація, яка, як правило, супроводжує роботу будь-якого промислового агрегату, є високочастотним процесом. Такий високочастотний процес містить постійну складову, корисний сигнал, низькочастотний тренд, шумову складову. Для виділення корисного сигналу необхідно здійснити математичні і статистичні перетворення.

Реалізація методики віброконтролю зумовлює перехід від часової реалізації в частотну. На частотній реалізації виділяються локалізації сигналу, які відповідають поточному стану вузлів промислових об'єктів. В історичному плані виділяються такі методи спектрального перетворення: перетворення Фур'є, віконне перетворення Фур'є, неперервне вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення.

Вибір і реалізація методу контролю стану вузлів промислового обладнання є проблемою для вирішення.

Метою статті є розробка алгоритму контролю стану паливної системи дизельних агрегатів за допомогою безрозбірних технологій і реалізація її на практиці.

Аналіз методів спектрального перетворення. Найбільш розповсюдженим методом спектрального перетворення є перетворення Фур'є (ПФ). Воно ґрунтується на декомпозиції вихідного сигналу на комплексні експоненційні функції різних частот. Процес декомпозиції задається двома рівняннями:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{-2\pi f t} df \quad (2)$$

де $x(t)$ – реалізація сигналу в часі;
 $X(f)$ – частотне представлення сигналу;
 $e^{-2\pi f t}$ – ядро перетворення.

Рівняння (1) є перетворенням Фур'є сигналу $x(t)$, рівняння (2) – оберненим перетворенням Фур'є $X(f)$, в результаті чого отримуємо $x(t)$.

Частотний спектр, який є сукупністю частотних спектральних компонент, відображає наявність тих чи інших частот в сигналі і наочно демонструє ознаки, які неможливо відобразити в часовій області, що обмежує використання ПФ тільки для стаціонарних сигналів [1]. Для нестаціонарних у часі сигналів виникають методичні похибки [1, 2].

Для усунення методичних похибок при застосуванні ПФ на практиці використовують віконне перетворення Фур'є (ВПФ) [3–5]. У ВПФ фактично нестаціонарний у часі сигнал розбивають на інтервали (вікна), в межах яких сигнал вважається стаціонарним.

Для ВПФ [1, 2]:

$$STFT_x^{(\omega)}(t', f) = \int_x [x(t) \cdot \omega^*(t-t')] e^{-2\pi f t} dt, \quad (3)$$

де $\omega^*(t)$ – віконна функція;

t – величина зсуву віконної функції у часі.

Як слідує з (3) ВПФ фактично є добуток ПФ сигналу і віконної функції. При віконному перетворенні Фур'є для кожного t і f вираховується свій коефіцієнт ВПФ.

Проблеми ВПФ виникають за принципом невизначеності Гейзенберга. За цим принципом, при застосуванні частотно-часового перетворення, неможливо отримати довільно точні представлення сигналу по частоті і за часом. Відносно ВПФ це значить що при виборі вузького вікна можна очікувати на хорошу роздільну здатність по частоті і погану за часом. Широке вікно призводить до протилежних результатів, коли піки стають не досить добре розділені у часі, але частотна роздільна здатність покращилась.

Вказаний недолік усуває неперервне вейвлет-перетворення. Пряме неперервне вейвлет-перетворення виконується відповідно до виразу [1, 6]:

$$W_{\Psi}(a, b)X = \frac{1}{\sqrt{c_{\Psi}}} \int \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) X(t) dt, \quad (4)$$

де $W_{\Psi}(a, b)X$ – вейвлет-коефіцієнти;

$\Psi(t)$ – материнський вейвлет;

a і b – параметри, які визначають відповідно масштаб (частоту) і зсув (час) функції $\Psi(t)$;

c_{Ψ} – нормувальний множник.

Для відновлення вихідного сигналу за відомими вейвлет-коефіцієнтами, використовують зворотне до (4) вейвлет-перетворення:

$$X(t) = \frac{1}{\sqrt{c_{\Psi}}} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) [W_{\Psi}(a, b)X] \frac{dadb}{a^2}.$$

Материнський вейвлет $\Psi(t)$ створює за допомогою розтягування та стиснення сімейство вейвлетів $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$.

Обчислення вейвлет-спектра сигналу $X(t)$, який представлений дискретним набором відліків N , стикається з обчисленням у кожній точці спектру N інтегралів від вейвлет-функцій для кожної пари індексів i та j [1]:

$$W_{g_n}(a_i, b_j)X = \frac{1}{\sqrt{c_{g_n}|a_i|}} \sum_{k=1}^N x_k \int_{t_{k-1}}^k \left[g_n\left(\frac{t-b_j}{a_i}\right) \right] dt. \quad (5)$$

Вираз (5) можна подати у вигляді:

$$W_{g_n}(a_i, b_j)X = \frac{a_i}{\sqrt{c_{g_n}|a_i|}} \sum_{k=1}^N x_k \left[g_{n-1}\left(\frac{t_{k-1}-b_j}{a_i}\right) - g_{n-1}\left(\frac{t_k-b_j}{a_i}\right) \right],$$

де $W_{g_n}(a_i, b_j)X$ – вейвлет-коефіцієнти, які вираховані за допомогою гаусівського вейвлету n -го порядку;

$g_{n-1}(t)$ – гаусівський материнський вейвлет $(n-1)$ -го порядку;

c_{g_n} – нормувальний множник;

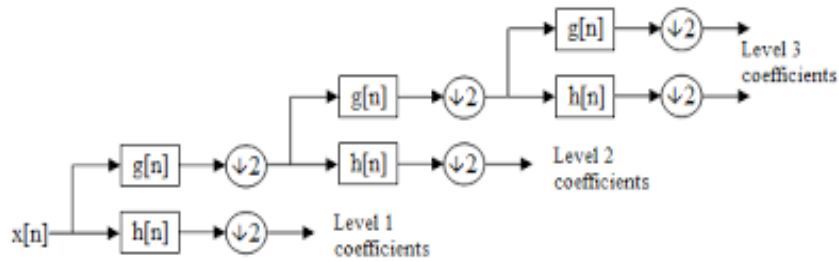


Рис. 1. Реалізація вейвлет перетворення материнським вейвлетом Хаара

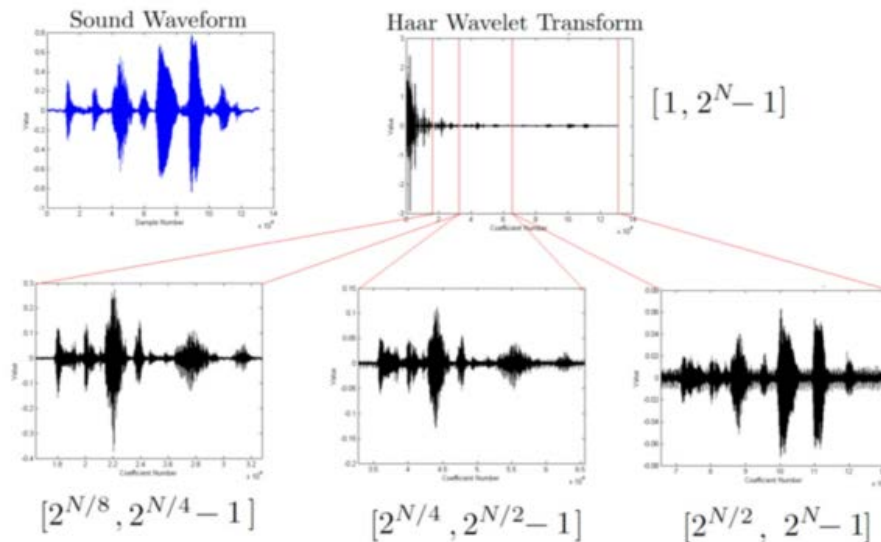


Рис. 2. Результат дискретного вейвлет перетворення

Результатом дискретного вейвлет перетворення сигналу Sound Waveform є перетворений сигнал діапазону $[1, 2^N - 1]$ (див. рис. 2), який дозволив виділити корисну складову – $[1, 2^{N/8} - 1]$ і шумову складову $[2^{N/2}, 2^N - 1]$ вимірювального сигналу [7]. Низькочастотний тренд і постійна складова відсікаються апаратурно.

Реалізація віброконтролю на практиці. В якості об'єкта дослідження була обрана паливна система дизель-генераторної установки [8]. Структурна схема паливної системи представлена на рис. 3.

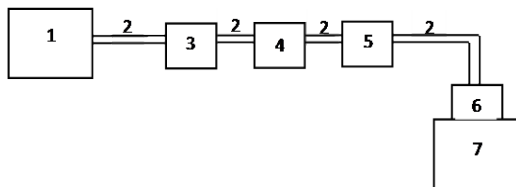


Рис. 3. Структурна схема паливної апаратури дизеля

Відповідно до рис. 3 паливна система складається з [8]:

- 1 – паливного бака;
- 2 – паливопровода;
- 3 – паливного насоса;
- 4 – фільтра;
- 5 – паливного насоса високого тиску;
- 6 – форсунки;
- 7 – камери згоряння.

Одним із найважливіших вузлів паливної системи дизеля є форсунка. На практиці саме форсунка найбільш часто виходить з ладу. На рис. 4 представлена схема нормально закритої форсунки. Вибросигнал для оцінки стану паливної системи знімається за допомогою інформаційно-вимірювального каналу, схема якого подана на рис. 5 [8, 9].

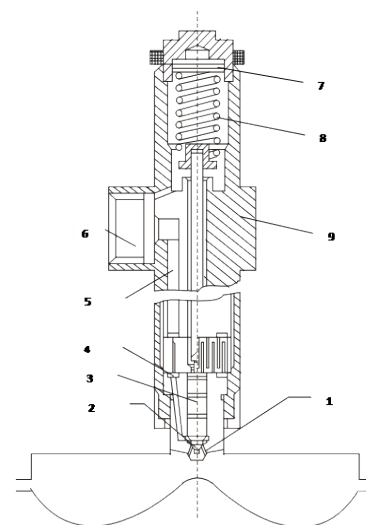


Рис. 4. Нормально-закрита форсунка

На рис. 4 введені наступні позначення [8]:
- 1 – сопловий отвір;

- 2 – запірний конус розпилювача;
- 3 – запірна голка;
- 4 – кільцевий канал;
- 5 – паливний канал;
- 6 – отвір штуцера;
- 7 – пружина;
- 8 – запірна пружина;
- 9 – корпус форсунки.

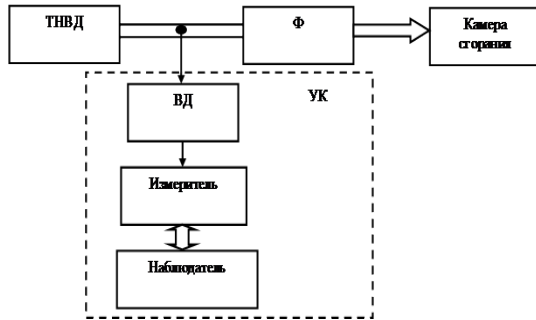


Рис. 5. Схема вимірювального каналу

Вимірювальний канал, за допомогою якого здійснюється фіксація механічної вібрації складається з п'єзоелектричного віброакселерометра АП18, вимірювача (для нормалізації вібраційного сигналу) і спостерігача, який здійснює ряд сервісних функцій.

В ході досліджень у форсунки вводились типові несправності, які спричиняли аварійне функціонування паливної системи. Знімалися показання процесу механічної вібрації і, в подальшому, аналізувались. Такі вібросигнали: норма 1, норма 2, ненорма 1, ненорма 2, разом з графічними представленнями, подані на рис. 6.

Для формування алгоритму контролю необхідно надати певні теоретичні викладки [10]. Розглянемо об'єкт контролю як випадковий вектор $\bar{Y} = (Y_1, \dots, Y_N)$, складові якого є вимірювальними інформативними параметрами. Простір спостережень складових, наприклад, двох випадкових векторів \bar{X} і \bar{Y} – це нормований евклідовий простір E_N , метрика $d_{E_N}(\bar{X}, \bar{Y})$ якого визначається нормою:

$$\|\bar{X} - \bar{Y}\| = \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{(\bar{x}_j - \bar{y}_j)^2}{\sigma_{x_j}^2 + \sigma_{y_j}^2} \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

Модель контролю, в нашому випадку, параметрична за мінімумом середнього ризику [11], коли розподілення ймовірностей векторів \bar{X} і \bar{Y} – це багатомірні нормальні закони розподілення з векторами \bar{x}_j , \bar{y}_j середніх і діагональними дисперсійними матрицями D_x , D_y , складених з дисперсій $\{\sigma_{x_j}^2\}_1^N$ і $\{\sigma_{y_j}^2\}_1^N$, відповідно.

В якості цільової функції оптимізації розмірності N простору E_N зручно використати ймовірність помилки контролю другого роду (β), якщо ймовірність помилки першого роду (α) не більше заданої величини (наприклад, 0.05). Така цільова функція відповідає

задачі оптимізації за критерієм Неймана-Пірсона, а правило вибору рішення має найбільшу потужність серед інших правил, для яких рівень значущості α не перевищує задану величину.

Якщо $X_j^{(0)}$ і $X_j^{(1)}$ інформативні статистики, які характеризують, відповідно стани S_0 і S_1 об'єкта контролю, то статистична відстань між цими станами, з урахуванням норми (6) і моделі багатомірного контролю [10, 11], буде визначатись виразом:

$$d = \sum_{j=1}^N \frac{(X_j^{*(0)} - X_j^{*(1)})^2}{\left(\sigma_{X_j^{*(0)}}^2 + \sigma_{X_j^{*(1)}}^2 \right)}. \quad (7)$$

У виразі (7) $X_j^{*(0)}$ і $X_j^{*(1)}$ – це оцінки середніх значень статистик $X_j^{(0)}$ і $X_j^{(1)}$, а d – квадрат геометричної відстані між векторами $X_j^{(0)}$ і $X_j^{(1)}$.

Якщо дисперсії $\sigma_{X_j^{*(0)}}^2$ і $\sigma_{X_j^{*(1)}}^2$ відомі, то d – це випадкова величина з χ^2 -розподіленням, яка має N степеней свободи. Позначимо як $d_{кр}$ критичне значення для відстані d , яке дорівнює $(\alpha \cdot 100)$ -відсотковій точці $\chi_{N, \alpha}^2$ χ^2 -розподілення. Якщо m_d і σ_d^2 – відповідно середнє і дисперсія відстані d , коли відстань для S_0 характеризує появу дефекту, то ймовірність помилки другого роду можна визначити через інтеграл ймовірності $\Phi(\rho)$ [10, 12], аргумент якого:

$$\rho = \frac{m_d - d_{кр}}{\sigma_d}.$$

Тоді:

$$\beta = 1 - \Phi\left(\frac{m_d - d_{кр}}{\sigma_d}\right).$$

Для оцінки дисперсій $\sigma_{X_j^{*(0)}}^2$ і $\sigma_{X_j^{*(1)}}^2$ скористаємось моделлю апроксимації нецентрального закону розподілення χ^2 [12]. Отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma_{X_j^{*(0)}}^2 \geq 2X_j^{*(0)}; \\ \sigma_{X_j^{*(1)}}^2 \geq 2X_j^{*(1)}, \end{cases}$$

а вираз (6) прийме вигляд нерівності, яка дозволяє знайти нижню границю квадрата геометричної відстані d між станами S_0 і S_1 :

$$d = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{(X_j^{*(0)} - X_j^{*(1)})^2}{(X_j^{*(0)} + X_j^{*(1)})}. \quad (8)$$

На основі викладених теоретичних аспектів розроблено алгоритм контролю стану паливної системи дизелів. Цей алгоритм описується наступною послідовністю:

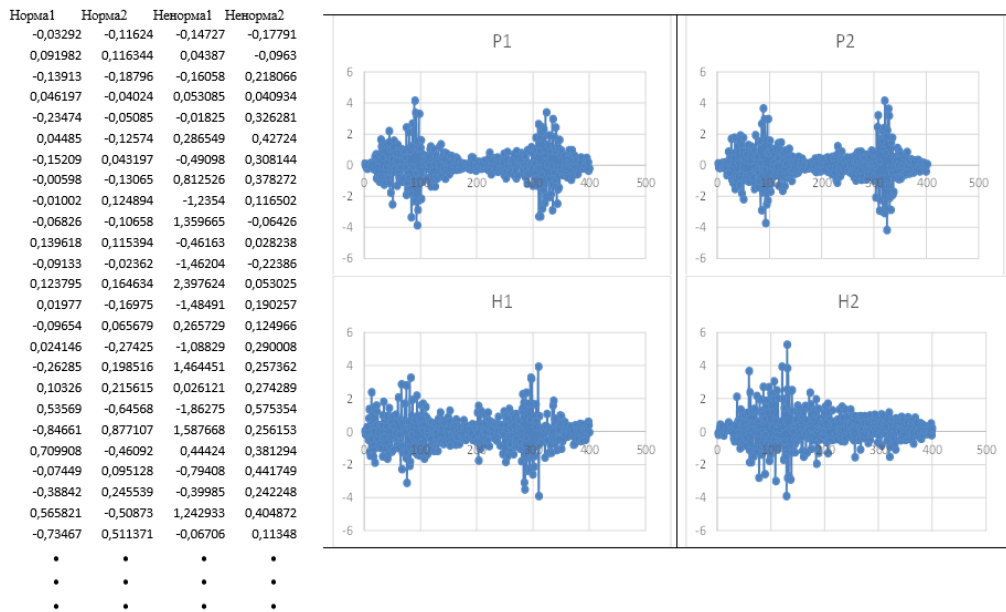


Рис. 6. Вібросигнали об'єкту контролю

1. Отримання і нормалізація вихідних вимірювальних сигналів механічної вібрації:

$$X_i = \frac{x_i - m_{cp}}{D}$$

де x_i – вимірне значення механічної вібрації за допомогою вимірювального каналу;

X_i – нормалізоване значення вимірювального сигналу;

m_{cp} – середнє значення вибірки;

D – дисперсія вибірки.

2. Проведення дискретного вейвлет перетворення.

3. Виділення відліків нижніх частот діапазону $[1, 2^{N/8} - 1]$.

4. Визначення діагностичного показника на основі виразу (8).

5. Оцінка показника d за принципом:

- $d \approx 0$ – вибірки ідентичні;

- $d \gg 0$ – вибірки різного характеру.

6. Прийняття рішення щодо справності вузла обладнання.

За результатами натурних досліджень були отримані наступні результати (див. табл. 1) [13].

Таблиця 1 – Експериментальні дослідження параметру контролю d стану обладнання

	d_{P1P2}	d_{P1H1}	d_{P1H2}	d_{P2H1}	d_{P1H2}	d_{H1H2}
d	2.04	15.04	6.38	120.37	14.34	20.12

Дані таблиці підтверджують справедливість результату контролю паливної системи дизель-генераторної установки за сигналами механічної вібрації стінок паливопроводу високого тиску та обраної методики.

Висновки. 1. Проаналізовані методи спектрального перетворення вимірювального високочастотного сигналу та обраний оптимальний

метод для реалізації контролю стану вузлів складних промислових агрегатів в режимі реального часу.

2. Розглянутий метод дискретного вейвлет перетворення із материнським вейвлетом Хаара, розроблений алгоритм контролю стану вузлів складного промислового обладнання на підставі значення параметру контролю в просторі інформаційних ознак.

3. Обраний об'єкт контролю – паливна система дизель-генераторної установки, проведені натурні дослідження, отримані позитивні результати, які однозначно характеризують стан вузла дизеля [14].

Список літератури

1. Мигущенко Р. П. *Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. 224 с.
2. Щапов П. Ф., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю. *Теоретичні та практичні засади систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 260 с.
3. Залманзон Л. А. *Преобразования Фурье, Уолша, Хаара*. Москва: Наука, 1989. 496 с.
4. Дьяконов В. П. *Вейвлеты. От теории к практике*. Москва: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
5. Русинов Л. А., Новиков Л. В. *Спектральный поход к первичной обработке сигналов*. Ленинград: Ленинградский университет, 1984. 156 с.
6. Кропачек О. Ю. *Теоретичні основи аналізу і синтезу комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем діагностування динамічних нестационарних об'єктів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05*. Харків, 2018. 421 с.
7. Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Карпова Т. С. *Формирование системы корреляционно-спектральных информативных параметров нестационарных вибросигналов. Материали 21-ї міжнар. науково-технічної конф. «Проблеми інформатики та моделювання»*. Одеса, 2021. С. 3.
8. Кропачек О. Ю. *Методи і пристрій контролю віброприскорень стінок паливопроводу високого тиску дизельних агрегатів: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13*. Харків, 2004. 204 с.
9. Мигущенко Р. П., Гусельников В. К., Валуїська О. Ю. *Классификация состояния форсунок дизель-генераторной установки по числовым характеристикам. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер.: Енергетика і перетворювальна техніка*. Харків: НТУ «ХПІ», 2004. № 5. С. 88–92.

10. Мигущенко Р. П. *Методи і пристрої систем багатопараметрової функціональної діагностики вібраційних об'єктів (теоретичні основи та впровадження): дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13*. Харків, 2014. 475 с.
 11. Захожай В. Б., Чорний А. Ю. *Статистика якості*. Київ: МАУП, 2005. 576 с.
 12. Джонсон Н., Лион Ф. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента*. Москва: Мир, 1981. 520 с.
 13. Мигущенко Р. П. Экспериментальна перевірка моделі оптимізації простору діагностичних параметрів при вейвлет-перетвореннях вібросигналів дизельних агрегатів. *Вісник Нац. транспортного ун-ту*. Київ: НТУ, 2013. № 28. С. 343–350.
 14. Мигущенко Р. П. Экспериментальные исследования при оптимизации систем вибродиагностики по критерию минимума среднего риска. *Системы обработки информации*. 2014. Вып. 4 (120). С. 40–44.
- References (transliterated)**
1. Myhushchenko R. P. *Elementy kontrolyu ta diahnostryky stanu vibratsiynykh ob'yektiv* [Elements of control and diagnostics of the state of vibrating objects]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014. 224 p.
 2. Shchapov P. F., Myhushchenko R. P., Kropachek O. Yu. *Teoretychni ta praktichni zasady system kontrolyu ta diahnostuvannya skladnykh promyslovykh ob'yektiv* [Theoretical and practical principles of control systems and diagnostics of complex industrial objects]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015. 260 p.
 3. Zalmanzon L. A. *Preobrazovaniya Fur'e, Uolsha, Khaara* [Fourier, Walsh, Haar transforms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 496 p.
 4. D'yakonov V. P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, SOLON-R Publ., 2002. 448 p.
 5. Rusinov L. A., Novikov L. V. *Spektral'nyy pokhod k pervichnoy obrabotke signalov* [Spectral approach to primary signal processing]. Leningrad, Leningradskiy universitet Publ., 1984. 156 p.
 6. Kropachek O. Yu. *Teoretychni osnovy analizu i syntezy komp'yuteryzovanykh informatsiyno-vymiryval'nykh system diahnostuvannya dynamichnykh nestatsionarnykh ob'yektiv: dys. ... d-ra tekhn. nauk 05.13.05* [Theoretical bases of analysis and synthesis of computerized information-measuring systems for diagnosing dynamic non-stationary objects. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2018. 421 p.
 7. Migushchenko R. P., Kropachek O. Yu., Karpova T. S. *Formirovanie sistemy korrelyatsionno-spektral'nykh informativnykh parametrov nestatsionarnykh vibrosignalov* [Formation of a system of correlation-spectral informative parameters of non-stationary vibration signals]. *Materialy 21-yi mizhnar. naukovy-tekhnichnoyi konf. "Problemy informatyky ta modelyuvannya"* [Materials of the 21st Int. scientific and technical Conf. "Problems of computer science and modeling"]. Odesa, 2021, p. 3.
 8. Kropachek O. Yu. *Metody i prystroiy kontrolyu vibropryskoren' stinok palyvoprovodu vysokoho tysku dyzel'nykh ahrehativ: dys. ... kand. tekhn. nauk 05.11.13* [Methods and the device of control of vibration accelerations of walls of a fuel line of a high pressure of diesel units. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2004. 204 p.
 9. Migushchenko R. P., Gusel'nikov V. K., Valuys'ka O. Yu. *Klassifikatsiya sostoyaniya forsunok dizel'-generatornoy ustanovki po chislovym kharakteristikam* [Classification of the condition of the diesel generator set injectors by numerical characteristics]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Enerhetyka i peretvoryval'na tekhnika* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and conversion technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 5, pp. 88–92.
 10. Myhushchenko R. P. *Metody i prystroiy system bahatoparametrovoyi funktsional'noyi diahnostryky vibratsiynykh ob'yektiv (teoretychni osnovy ta vprovadzhennya): dys. ... d-ra tekhn. nauk 05.11.13* [Methods and apparatus of systems for multiparameter functional diagnostics of vibrating objects (theoretical foundations and implementation). Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2014. 475 p.
 11. Zakhzhay V. B., Chornyy A. Yu. *Statystyka yakosti* [Quality statistics]. Kyiv, MAUP Publ., 2005. 576 p.
 12. Dzhonson N., Lion F. *Statistika i planirovaniya eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody planirovaniya eksperimenta* [Statistics and experiment planning in technology and science. Experiment Design Methods]. Moscow, Mir Publ., 1981. 520 p.
 13. Myhushchenko R. P. *Eksperymental'na perevirka modeli optimizatsiyi prostoru diahnostychnykh parametrov pry veyvlet-peretvorennyakh vibrosyhnaliv dyzel'nykh ahrehativ* [Experimental verification of the model of optimization of the space of diagnostic parameters during wavelet transformations of vibration signals of diesel units]. *Visnyk Nats. transportnoho un-tu* [Bulletin of the National transport university]. Kyiv, NTU Publ., 2013, no. 28, pp. 343–350.
 14. Migushchenko R. P. *Eksperymental'nye issledovaniya pri optimizatsii sistem vibrodiagnostiki po kriteriyu minimuma srednego riska* [Experimental studies in optimization criterion systems vibration monitoring minimum average risk]. *Sistemy obrobky informatsiyi*, 2014, issue 4 (120), pp. 40–44.

Надійшла (received) 08.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович (Migushchenko Ruslan Pavlovich, Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2523-595X>; e-mail: mrp1@ukr.net

Ребров Олексій Юрійович (Rebrov Aleksey Yuryevich, Rebrov Oleksiy) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com

Кропачек Ольга Юрійвна (Kropachek Olga Yuryevna, Kropachek Olha) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теоретичні основи електротехніки»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>; e-mail: kropachek@ukr.net