

УДК 629.423.2:681.518.54

ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСТОТНИХ СМУГ ВІБРАЦІЇ ПІДШИПНИКІВ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА КРАТНОМАСШТАБНИМ АНАЛІЗОМ

Докт. техн. наук В. Г. Пузир, канд. техн. наук С. В. Михалків,
старш. викл. А. М. Ходаківський, інж. В. І. Бульба

CALCULATION OF THE FREQUENCY BANDS OF BEARING VIBRATION FOR THE TRACTION GEARBOXES OF ELECTRIC TRAINS BY THE MULTIREOLUTION ANALYSIS

D.Sc. (Tech.) V. Puzyr, PhD (Tech.) S. Mykhalkiv,
Sr. lecturer A. Khodakivskyi, Eng. V. Bulba

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.185.2019.180784>

У статті розглянута властивість дискретного вейвлет-перетворення, яке засноване на кратномасштабному аналізі, здатність виявляти різну природу вібрації підшипників і зубчастого зачеплення. Обрання найкращого материнського вейвлету запропоновано здійснювати за розрахованою мінімальною ентропією Шеннона. Для оцінювання періодичності імпульсного наповнення у відновлених сигналах за деталізованими коефіцієнтами розраховувалась автокореляція, яка не лише здатна відрізнити складові вібрації підшипника від зубчастого зачеплення, а й дозволяє разом із коефіцієнтом ексцесу за обраними рисами визначати частотну смугу вібрації підшипника.

Ключові слова: вейвлет, вібрація, імпульс, підшипник, спектр, тяговий редуктор.

The paper deals with the property of discrete wavelet transform based on the multiresolution analysis feature to identify different types of the gear and bearing vibration. The direct analysis of the vibration time series by the use of conventional statistical measures, such as mean, root mean square, standard deviation, is not always useful due to the complexity of the signal. It was proposed to choose the best mother wavelet which is able to identify the transients in vibration signal according to the calculated minimum value of Shannon entropy, which quantifies the level of uncertainty of a given vibration time series. The main idea is that when a bearing is healthy, it will produce low amplitude random vibration with a uniform-like probability mass function and as the fault occurs and progresses some probability mass function component will be prevalent with a higher probability of occurrence. The chosen Daubechies wavelet of the 4-th order has decomposed the acquired vibration signal of the traction gearbox of electric train into approximated and detailed coefficients on four decomposition scales with further reconstruction of the signals on the appropriate scales according to the above-mentioned coefficients. The autocorrelation was applied for the detection of deterministic and random components in the reconstructed signals through evaluation of the impulse periodicities of the reconstructed signals according to the detailed coefficients at all scales and has taken the sinusoidal shape for the reconstructed signals according to the approximated coefficients. It was established that a deterministic vibration component dominates and there are no bearing damage features in the reconstructed signals according to the approximated coefficients due two strong gearmesh harmonics. The presence of impulse periodicity on the reconstructed signals according to the detailed coefficients at the second decomposition scale is possible to monitor due to the correlogram, which can be explained by the periodic contact of the damaged element with other elements during their rotation in bearing. The kurtosis is applied

as a reliable tool for the frequency band selection where the bearing vibration has the strongest excitation.

Keywords: bearing, impulse, spectrum, traction gearbox, vibration, wavelet.

Вступ. Упродовж останнього часу докладаються наполегливі зусилля для пошуку дієвих методів раннього виявлення пошкоджень підшипників кочення і зубчастих зачеплень. Втрати від непрогнозованого розвитку таких пошкоджень та руйнування обладнання можуть бути суттєвими. Діагностування, що засноване на аналізі вібрації, набуло популярності у визначенні технічного стану механічних вузлів у різних галузях промисловості й на транспорті зокрема [1]. Для обробки сигналів і отримання з них діагностичних ознак застосовують різні методи, що зосереджуються на часовому й частотному просторах [4]. Здебільшого сигнали вібрації, отримані під час діагностування, є комплексними й нестационарними з високим рівнем шуму і не завжди періодичні, що ускладнює виявлення пошкоджень підшипників кочення у згаданих просторах. Отже, пошук нових методів аналізу цих сигналів є актуальним як для залізничного транспорту, так і для інших галузей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання найменш складних обчислень статистичних індикаторів для оцінювання вібраційних реалізацій (середньоквадратичне значення, дисперсія, ексцес тощо) набуло широкого

вжитку впродовж останніх років, однак не продемонструвало такої високої ефективності у визначенні виду пошкодження підшипника кочення, як обчислення частотних характеристик із подальшим їх знаходженням на широкосмугових спектрах вібрації, спектрах обвідної вібрації [6, 7, 11].

Ефекти модуляції й шумові компоненти сигналів вібрації є двома найбільшими труднощами, які супроводжують діагностування підшипників кочення тягових редукторів електропоїздів. Амплітудна модуляція спричиняє поширення гармонік частот обертання елементів підшипника з найвищою амплітудою навколо резонансної частоти, яку здебільшого заледве можна ідентифікувати у високочастотному діапазоні внаслідок наявного шуму й впливу сильних низькочастотних компонент зубчастого зачеплення $f_{z1}=268$ Гц, $f_{z2}=536$ Гц (рис. 1).

Виявити ранню стадію розвитку пошкодження елементів підшипника внаслідок впливу згаданих факторів видається ще важчим. Отже, потреба у залученні дієвих методів із здатністю посилювати корисні складові вібраційних сигналів у відповідних частотних смугах є першочерговим завданням [9].

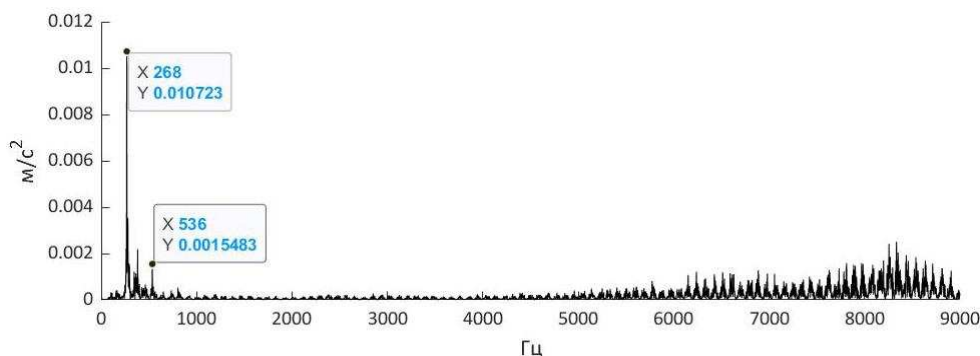


Рис. 1. Широкосмуговий спектр вібрації тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т із пошкодженим підшипником

Натепер накопичений певний досвід використання частотно-часового методу вейвлет-перетворення в різних промислових застосуваннях, який має локальні характеристики у часовому й частотному просторі та мінливе частотно-часове вікно. Вважається, що вейвлет-перетворення нестационарних сигналів надає кращі результати, ніж класичне перетворення Фур'є [2–4], а вибір материнської вейвлет-функції досі не втратив актуальності у процесах діагностування несправностей обладнання з вузлами обертання [10].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є отримання інформативної частотної смуги підшипникової вібрації тягового редуктора електропоїзда із використанням дискретного вейвлет-перетворення (ДВП), що засноване на кратномасштабному аналізі.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв'язати такі завдання:

— обрати прийнятний материнський вейвлет для реалізації ДВП;

— дослідити властивості відновлених сигналів за апроксимованими й деталізованими вейвлет-коефіцієнтами;

— запровадити інструментарій із вибору тієї частотної смуги, де діагностичні ознаки технічного стану підшипника кочення проявляються найсильніше.

Основна частина дослідження. Вібрація, яка зареєстрована на тяговому редукторі електропоїзда ЕР2Т, зазвичай містить суму детермінованих компонентів $u(t)$, які спричиняються ексцентриситетом, згином вала шестірні відносно колісної пари із зубчастим колесом, пошкодженнями самого зубчастого зачеплення та випадкових компонентів $f(t)$, які пов'язують з пошкодженнями підшипників кочення, m/c^2 ,

$$x(t)=u(t)+f(t). \quad (1)$$

Наведений вираз бере до уваги наявність одного віброакселерометра на корпусі тягового редуктора, сталу частоту

обертання колісної пари на випробувальному стенді ($f_{об.к.п.} = 3,63$ Гц) та значно менше число гармонік детермінованих компонентів, ніж циклічних імпульсних відгуків.

Детермінована компонента вібрації зубозачеплення $u(t)$ із періодом T_1 здебільшого наповнена потужними періодичними сигналами з меншою частотою, ніж несуча підшипникова частота циклічних імпульсних відгуків, m/c^2 ,

$$u(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t), \quad (2)$$

де $\omega_1 = 2\pi / T_1$ – кутова частота детермінованої компоненти, рад/с;

a_n – n -на амплітуда гармоніки косинусоїди, m/c^2 ;

b_n – n -на амплітуда гармоніки синусоїди, m/c^2 .

Отже, вібраційний сигнал суміші складової зубозачеплення та підшипникової складової містить також багато монокомпонентних складових [7].

Використання класичного перетворення Фур'є перетворює сигнал на лінійну суперпозицію стаціонарних синусів і косинусів різної частоти, що унеможливорює здійснювати точний опис локальних частотно-часових змін у сигналі [2]. Натомість ДВП розкладає вібраційний сигнал на вейвлет-коефіцієнти, які демонструють, наскільки добре материнська вейвлет-функція корелює із сигналом. Якщо частотна компонента вібраційного сигналу дорівнює відповідному масштабу вейвлет-перетворення, тоді дочірній вейвлет, що генерується материнським вейвлетом, на цьому масштабі збігається або максимально наближується до частотної компоненти сигналу саме в той проміжок часу, коли з'являється згадана компонента. У результаті вейвлет-коефіцієнти набувають найвищого значення саме на цьому часовому відрізку й

масштабі. У дослідженні обиралося пірамідальне вейвлет-розкладання, яке ділить сигнал на апроксимовану (низько-частотну) та деталізовану (високочастотну) складову. Далі на вищих рівнях зазнають розкладання лише апроксимовані складові [11]. Вейвлет-функція $\varphi(t)$ і масштабна функція $\Phi(t)$ розкладають сигнал на різні частотно-часові масштаби. Вейвлет-функція $\varphi(t)$ продукує деталізовану складову, а масштабна функція $\Phi(t)$ генерує апроксимовану складову розкладеного сигналу. ДВП добре пасує до

аналізу високочастотних короткотривалих нестационарних складових, які володіють потенційною інформативністю щодо ознак наявних пошкоджень.

Першою головною характеристикою ДВП є здатність реалізовувати кратномасштабний аналіз, який розкладає початковий сигнал на декілька інших сигналів на різних рівнях (масштабах) і відновлення яких здатне повернути початковий сигнал без втрати інформації.

Рекурсивний математичний опис кратномасштабного аналізу є таким:

$$V_j = W_{j+1} \oplus V_{j+1} = W_{j+1} \oplus W_{j+2} \oplus \dots \oplus W_{j+n} \oplus V_n, \quad (3)$$

де V_{j+1} – апроксимована версія вхідного сигналу на масштабі $j+1$;

W_{j+1} – деталізована версія, що відображає короткотривалі особливості вхідного сигналу на масштабі $j+1$;

\oplus – сума двох розкладених сигналів;

n – рівень розкладання.

Використанню ДВП передують визначення вейвлет-функції $\varphi(t)$ і масштабної функції $\Phi(t)$, дискретні версії яких мають бути ортонормованими і мати вигляд

$$\phi_{j,n}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \sum_n c_{j,n} \varphi(2^j t - n); \quad (4)$$

$$\varphi_{j,n}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \sum_n d_{j,n} \varphi(2^j t - n), \quad (5)$$

де c_j – масштабний коефіцієнт на масштабі j ;

d_j – вейвлет-коефіцієнт на масштабі j .

Початковий сигнал $x_j(t)$ на масштабі j розкладається на часові відрізки $x_j(t) = (v_0, v_1, \dots, v_{N-1})$ довжиною $N = 2^j$, де J – ціле число. Для ДВП часового відрізка $x_j(t)$ математичний рекурсивний вираз (3) виглядає

$$\text{ДВП}(x_j(t)) = 2^{\frac{(j+1)}{2}} \left(\sum_n u_{j+1,n} \varphi(2^{j+1} t - n) + \sum_n w_{j+1,n} \varphi(2^{j+1} t - n) \right), \quad (6)$$

де $0 \leq n \leq \frac{N}{2^j} - 1$;

$u_{j+1,n} = \sum_k c_{j,k} v_{j,k+2n}$, $0 \leq k \leq \frac{N}{2^j} - 1$ – апроксимована версія на масштабі $j+1$;

$$w_{j+1,n} = \sum_k d_{j,k} v_{j,k+2n}, \quad 0 \leq k \leq \frac{N}{2^j} - 1 \quad \text{—}$$

деталізована версія на масштабі $j+1$;

$$d_k = (-1)^k c_{2^{j+1}-k}, \quad p = \frac{N}{2^j}.$$

Зважаючи на ортнормальні вейвлет-функції і (6), сигнал $x_j(t)$ може бути відновленим за обома коефіцієнтами $u_{j+1,n}$ і $w_{j+1,n}$ зворотнім ДВП (оскільки $V_j = W_{j+1} \oplus V_{j+1}$) [3].

Часові реалізації вібраційного сигналу тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т протягом експериментальних досліджень реєструвались віброакселерометром із робочим частотним діапазоном 2 – 9000 Гц. У цифровому самописці аналоговий сигнал

знавався дискретизації частотою $f_s = 46$ кГц. Максимальна частота на початку розкладання ДВП дорівнює частоті Найквіста $f_{max} = 23$ кГц. Обчислюється частотна смуга f_b кожного наступного рівня n розкладання для апроксимованої версії $(0; f_{max}/2^{n-1})$ і для деталізованої версії $(f_{max}/2^n; f_{max}/2^{n-1})$ із відповідними центральними частотами f_c (рис. 2) [8].

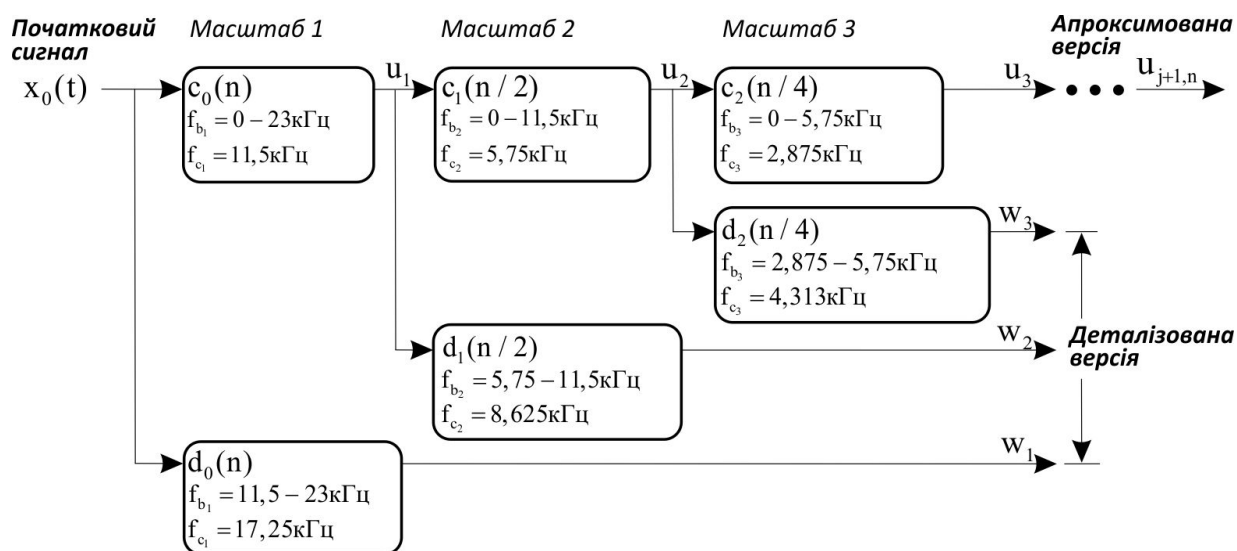


Рис. 2. Схема пірамідального ДВП

3-поміж великої вейвлетної родини обрання потрібного вейвлета здійснюється за критерієм мінімізації ентропії Шеннона обчислених вейвлет-коефіцієнтів [4].

$$s(p) = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

де p_i – розподіл імовірностей вейвлет-коефіцієнтів.

Ентропія міряє рівень невизначеності часових реалізацій. Відомо, що у справного підшипника генерується випадкова вібрація з низькою амплітудою та рівномірним розподілом, а коли трапляються й ширяться пошкодження, то певні компоненти

розподілу превалюють із вищою ймовірністю. Отже, ентропія рівномірного розподілу сягає максимальних величин (максимальна невизначеність), а дивергенція знижується до мінімуму, тоді як для часової реалізації із сильним імпульсним наповненням ентропія набуває мінімального значення, а дивергенція — максимального [5]. За результатами стендових досліджень вібрації підшипника кочення в університеті Саутгемптона [12] (рис. 3) ентропія Шеннона для справного підшипника дорівнює 2551, а для пошкодженого – 1376, що підтверджує згадане – ентропія справного підшипника є вищою і знижується залежно від прогресування пошкодження.

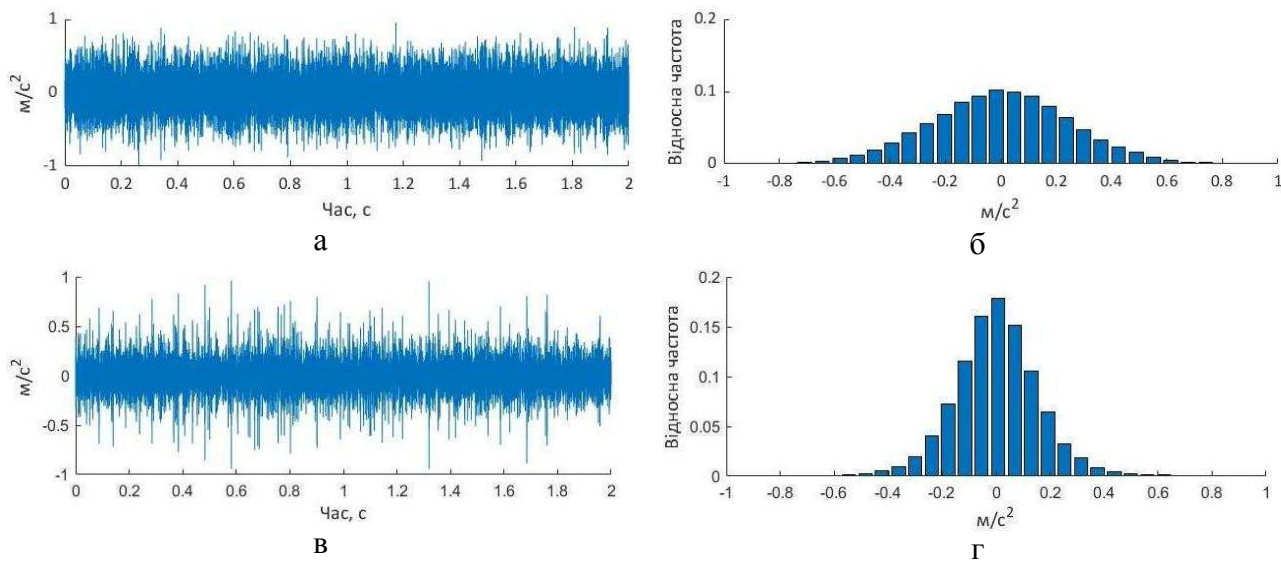


Рис. 3. Вібраційні реалізації підшипників, що перебувають у різних технічних станах: а – часова форма вібрації справного підшипника; б – щільність розподілу ймовірностей вібрації справного підшипника; в – часова форма вібрації пошкодженого підшипника; г – щільність розподілу ймовірностей вібрації пошкодженого підшипника

Аналогічні розрахунки провадилися для результатів ДВП низкою ортогональних материнських вейвлетів зареєстрованих вібраційних реалізацій тягового редуктора електропоїзда з пошкодженим підшипником (табл. 1).

Таблиця 1

Ентропія вейвлет-коефіцієнтів після ДВП різними материнськими вейвлетами

Материнський вейвлет	Ентропія
Добеші 1-го порядку	38,82
Добеші 2-го порядку	37,54
Добеші 3-го порядку	36,87
Добеші 4-го порядку	36,6
Койфлет 1-го порядку	39,83
Койфлет 2-го порядку	38,98
Койфлет 3-го порядку	38,29
Койфлет 4-го порядку	37,71
Симлет 2-го порядку	38,98
Симлет 3-го порядку	38,29
Симлет 4-го порядку	37,67
Хаар	39,83

Зважаючи на результати, як материнський вейвлет для ДВП обирався вейвлет Добеші 4-го порядку, який найкраще здатен вести облік короткотривалих складових у сигналі. Зростання порядку вейвлетів не збільшує тривалості обчислення вейвлет-коефіцієнтів.

Вібраційні характеристики роликів підшипників кочення здебільшого залежать від частоти обертання вала, геометричних розмірів підшипників і виду пошкоджень їх елементів. Поява пошкодження має імпульсний характер, який впливає на власну вібрацію підшипника, яка додатково модулюється періодичною силою, що збуджує. Також імпульси можуть здійснювати лише супровід шуму. Розвиток пошкоджень спричиняє набуття сигналами рис нелінійності та нестационарності. Деякі компоненти вібрації можуть мати спільні центральні частоти й частотні смуги, що перекриваються [2].

Знаючи, що обчислення періодів сильно виражених імпульсних складових на часових формах вібрації є недостатнім, основним завданням ДВП є пошук тієї

збудженої частотної смуги, де відношення сигнал/шум є найвищим. Пошкоджений елемент підшипника своєю поверхнею протягом перекочування контактує з іншими поверхнями й генерує імпульс, який простіше ідентифікувати у збудженій частотній зоні. За результатами зворотного ДВП численні імпульси різної природи добре видно на відновлених сигналах за деталізованими коефіцієнтами на 2–4 масштабі розкладання (рис. 4). Перший

масштаб розкладання до уваги не брався, зважаючи на недостатній верхній частотний діапазон віброакселерометра (9 кГц).

Подальше дослідження імпульсної природи отриманих частотних смуг здійснювалось за допомогою автокореляції, яка використовується для визначення самоподоби сигналу на різних проміжках часу [14] і є важливим діагностичним інструментарієм для аналізу часових вібраційних реалізацій,

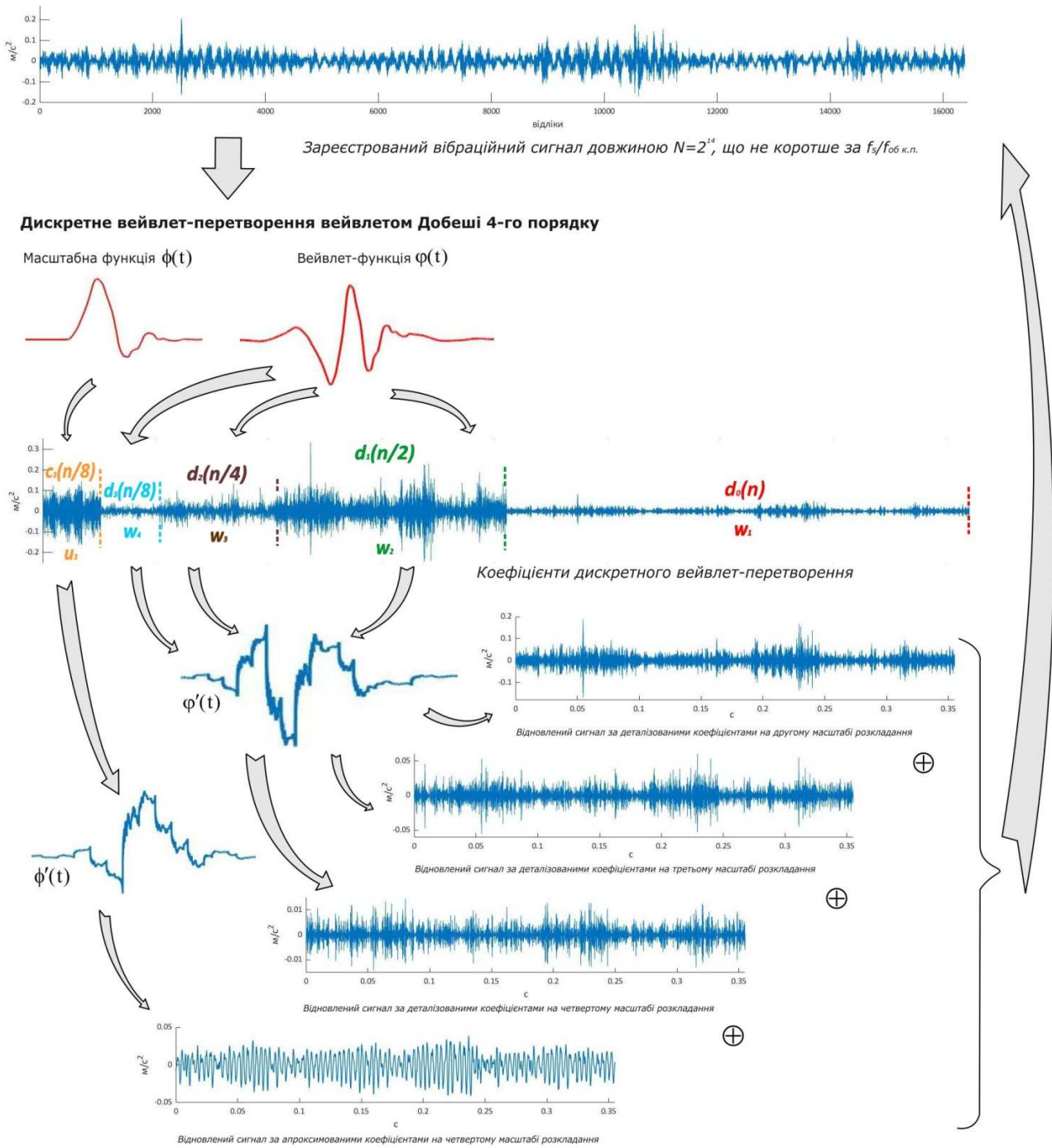
$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(N-k)\sigma^2} \sum_{t=1}^{N-k} (v_t - \mu)(v_{t+k} - \mu), \quad (8)$$

де k — інтервал у часі між відліками.

Графік автокореляції називається корелограмою та надає краще розуміння мінливих процесів у часі, даючи змогу порівнювати амплітуди вібраційних відліків, що відокремлені часовими проміжками. На вісь ординат корелограми наносяться коефіцієнти автокореляції, а на вісь абсцис — час. Цінність автокореляції полягає у задоволенні важливої вимоги діагностування — здатності виявляти інформативні складові технічного стану у вібраційних реалізаціях вузлів, що діагностуються [11].

На широкосмуговому спектрі вібрації відновленого сигналу з деталізованих коефіцієнтів на другому масштабі розкладання ДВП (рис. 5, а) помічений резонансний сплеск, що охоплює центральну частоту $f_{c_2} = 8,625$ кГц у частотній смузі $f_{b_2} = 5,75 - 9$ кГц. За фрагментом часової форми вібрації важко зробити висновок щодо періодичного характеру імпульсних складових (рис. 5, б). Натомість на корелограмі (рис. 5, в) відбувається посилення періодичності імпульсних складових. На спектрі на третьому масштабі розкладання ДВП

(рис. 5, г) резонансний сплеск зміщується вліво в бік частотного діапазону, зазначеного на рис. 2, а ознаки періодичності на корелограмі (рис. 5, е) втрачаються. Аналогічно на спектрі на четвертому масштабі розкладання ДВП (рис. 5, ж) відслідковується зміщення вліво резонансного сплеску в межах частотної смуги $f_{b_4} = 1,438 - 2,875$ кГц із центральною частотою $f_{c_4} = 2,156$ кГц. Корелограма (рис. 5, к) уздовж усієї довжини починає набувати чітких рис періодичності зі значним послабленням імпульсів. Знаючи [14], що автокореляційна функція білого шуму досягає найвищої величини при нульовому значенні осі абсцис і дорівнює нулю на ненульових значеннях, найближче пасує цьому описові корелограма на рис. 5, в другого масштабу розкладання, що якнайкраще зображує суміш імпульсів і шуму серед решти корелограм на інших масштабах розкладання. Зменшення шумових складових зі збільшенням масштабів розкладання відповідає переміщенню в нижчі частотні смуги внаслідок субдискретизації кратномасштабного аналізу.



Зворотне дискретне вейвлет-перетворення відновленою масштабною функцією $\phi'(t)$ і вейвлет-функцією $\psi'(t)$

Рис. 4. Схема прямого й зворотного ДВП вібраційного сигналу тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т

На трьох широкосмугових спектрах вібрації (рис. 5, а, г, ж) помічені енергетичні сплески, що лежать поза розрахованим на рис. 2 частотним діапазоном для кожного масштабу розкладання, що

свідчить про загальний недолік ортогональних вейвлетів – нездатність фіксувати короткотривалі складові на одному масштабі розкладання [13].

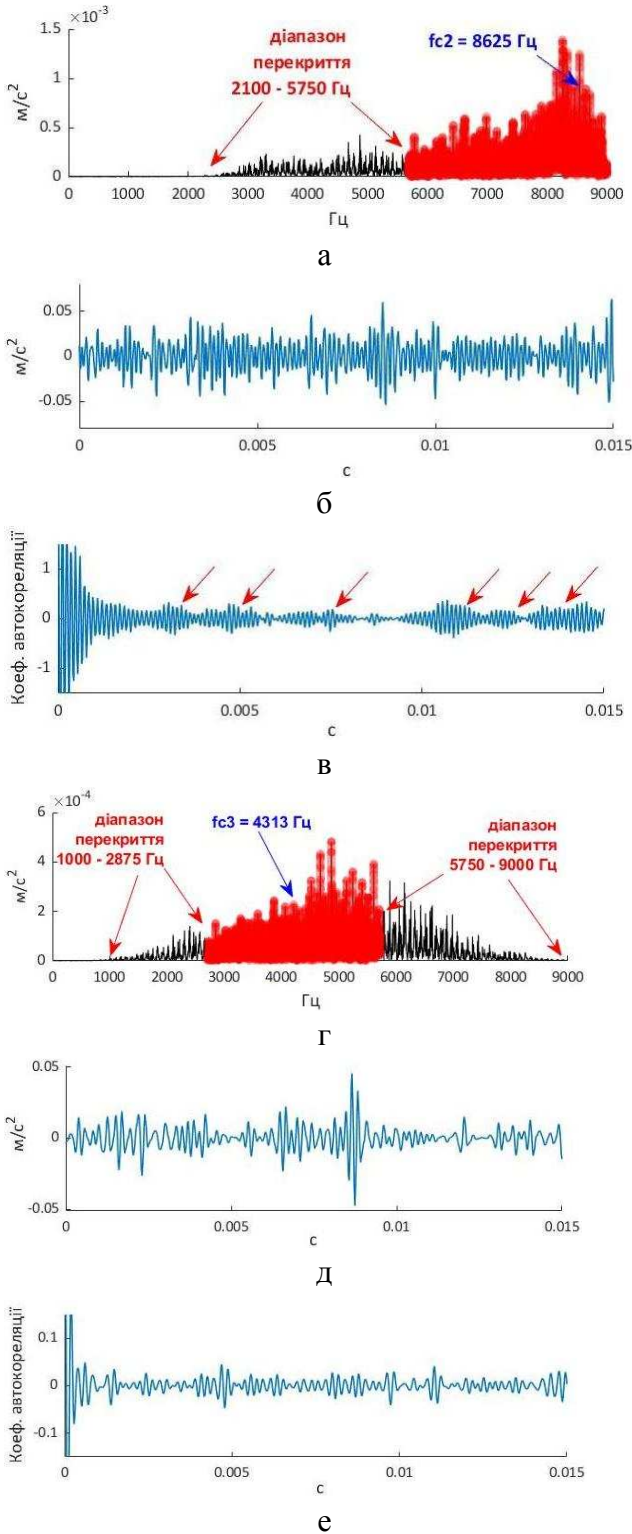


Рис. 5. Відновлені сигнали за деталізованими вейвлет-коефіцієнтами на різних масштабах розкладання та їх характеристики (початок)

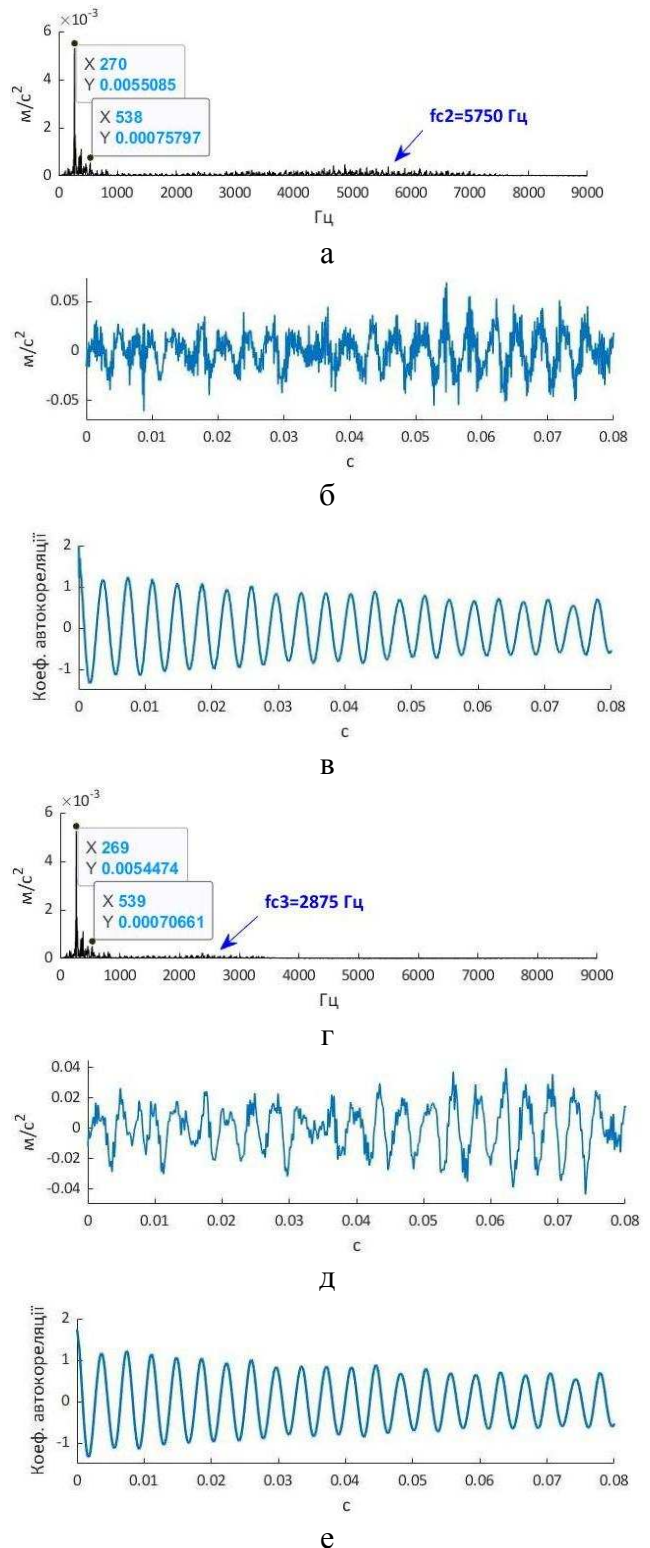


Рис. 6. Відновлені сигнали за апроксимованими вейвлет-коефіцієнтами на різних масштабах розкладання та їх характеристики (початок)

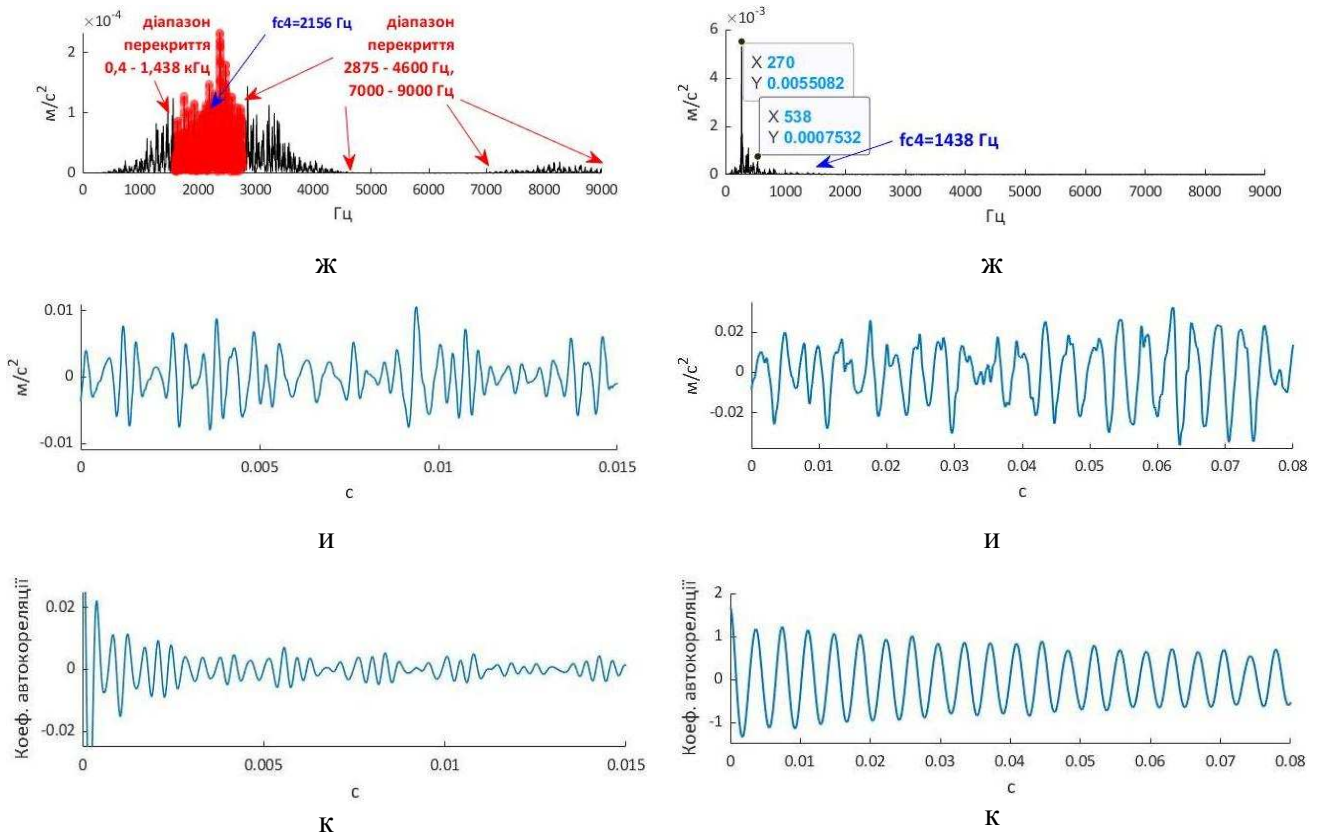


Рис. 5. Відновлені сигнали за деталізованими вейвлет-коефіцієнтами на різних масштабах розкладання та їх характеристики: а, г, ж – широкосмугові спектри вібрації на 2, 3, 4 масштабах розкладання; б, д, и – часові форми вібрації на 2, 3, 4 масштабах розкладання; в, д, к – корелограми на 2, 3, 4 масштабах розкладання (закінчення)

Рис. 6. Відновлені сигнали за апроксимованими вейвлет-коефіцієнтами на різних масштабах розкладання та їх характеристики: а, г, ж – широкосмугові спектри вібрації на 2, 3, 4 масштабах розкладання; б, д, и – часові форми вібрації на 2, 3, 4 масштабах розкладання; в, д, к – корелограми на 2, 3, 4 масштабах розкладання (закінчення)

Зовсім іншого сильно періодичного вигляду набувають корелограми відновлених сигналів із апроксимованих коефіцієнтів на всіх масштабах розкладання ДВП (рис. б, в, д, к). Відповідно до умов пірамідального ДВП на всіх апроксимованих версіях розкладання до частотних смуг потрапляє сильно виражена низькочастотна складова вібрації із першою f_{z1} та другою f_{z2} гармоніками зубозачеплення, які саме й надають корелограмі сильних рис періодичності й повністю придушують будь-які випадкові складові уздовж решти частотного

діапазону. Подібна поведінка пояснюється наявними детермінованими складовими вібрації зубчастого зачеплення $u(t)$ із (1), що робить відновлені сигнали із апроксимованих коефіцієнтів на різних масштабах розкладання ДВП повністю непридатними для пошуку ознак пошкоджень підшипників кочення.

Частотну смугу, яка містить діагностичну ознаку пошкодження підшипника, можна обирати за тим масштабом розкладання, де є відповідна періодичність імпульсних складових на корелограмах, що свідчить про певну

послідовність контакту наявної пошкодженої зони з іншими елементами підшипника протягом перекочування. Зрештою окремі сильно виражені неперіодичні імпульси також можуть слугувати діагностичною ознакою ранньої стадії зародження пошкодження й відрізнятися від звичайних численних імпульсів, що здійснюють лише супровід шуму. Розв'язати сформульоване непросте завдання дозволяє залучення потужного статистичного індикатора коефіцієнта ексцесу, який визнаний надійним інструментарієм виявлення імпульсного наповнення часової послідовності з низькою чутливістю до коливань навантаження та частоти обертання [4]

$$\gamma = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - \mu)^2 \right)^2}, \quad (9)$$

де μ – математичне сподівання, м/с^2 .

Ексцес справного й пошкодженого підшипника (рис. 3) $\gamma_{\text{справний}} = 3,01$, $\gamma_{\text{пошкодж}} = 4,92$ [12], що в черговий раз доводить актуальність використання цього безадресного статистичного індикатора технічного стану, який чутливий до імпульсного наповнення вібрації.

У табл. 2 наведені розраховані величини ексцесу для відновлених сигналів за апроксимованими й деталізованими коефіцієнтами на всіх масштабах розкладання.

Отже, відновлений сигнал за деталізованими складовими на 2 масштабі розкладання володіє найвищим ексцесом 6,25 з-поміж інших сигналів і частотна смуга $f_{b_2} = 5,75 - 9 \text{ кГц}$ може бути обрана для подальших досліджень із залученням методів спектра обвідної, квадратичного спектра обвідної вібрації для визначення виду пошкодження підшипника кочення.

Таблиця 2

Ексцес відновлених сигналів за відповідними коефіцієнтами після ДВП

Низка відновлених сигналів	Ексцес
Із апроксимованих коефіцієнтів на 2 масштабі розкладання	2,87
Із апроксимованих коефіцієнтів на 3 масштабі розкладання	2,41
Із апроксимованих коефіцієнтів на 4 масштабі розкладання	2,33
Із деталізованих коефіцієнтів на 2 масштабі розкладання	6,25
Із деталізованих коефіцієнтів на 3 масштабі розкладання	5,75
Із деталізованих коефіцієнтів на 4 масштабі розкладання	4,74

Висновки. Зважаючи на нестационарність сигналів вібрації тягового редуктора електропоїзда ЕР2Т і потребу в збереженні наявних численних інформативних короткотривалих складових, для реалізації ДВП обирався материнський вейвлет Добеші 4-го порядку. Критерієм обрання прийнятного вейвлету з-поміж великої вейвлетної родини запропоновано вважати мінімальне значення розрахованої ентропії Шеннона, яку додатково можна використовувати як діагностичну ознаку технічного стану.

Установлена корисна властивість кратномасштабного аналізу для цілей діагностування здійснювати поділ вібрації зубозачеплення й підшипникової вібрації завдяки обчисленню апроксимованих і деталізованих вейвлет-коефіцієнтів. Вони зберігають властивості двох різних природ вібрацій, притаманні зубчастому зачепленню та підшипникам кочення. Відповідно ці властивості зберігаються і у відновлених сигналах у вигляді сильно виражених детермінованих складових і суміші імпульсних і шумових складових.

Незважаючи на виявлений недолік кратномасштабного аналізу в наявних діапазонах перекриття на широкосмугових спектрах вібрації відновлених сигналів

короткотривалі інформативні складові вібрації чітко проявляються у відповідних частотних смугах і фіксуються на запропонованих корелограмах у вигляді імпульсних періодичностей і при високих

значеннях розрахованого коефіцієнта ексцесу. Це можна вважати діагностичними ознаками прояву пошкоджень підшипника у частотній смузі 5,75 – 9 кГц.

Список використаних джерел

1. Зубенко Д. Ю. Повышение надежности тяговых передач рельсового электротранспорта: монография. Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. 122 с.
2. Chen B., Shen B., Chen F., Tian H., Xiao W., Zhang F., Zhao C. Fault diagnosis method based on integration of RSSD and wavelet transform to rolling bearing. *Measurement*. 2019. Vol. 131. P. 400–411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.043>.
3. Gaing Z.-L. Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19(4). P. 1560–1568. URL: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835281>.
4. Kankar P. K., Sharma S. C., Harsha S. P. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet transform. *Neurocomputing*. 2011. Vol. 74(10). P. 1638–1645. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.01.021>.
5. Leite G. N. P., Araújo A. M., Rosas P. A. C., Stosic T., Stosic B. Entropy measures for early detection of bearing faults. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019. Vol. 514. P. 458–472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.09.052>.
6. Ming A. B., Qin Z. Y., Zhang W., Chu F. L. Spectrum auto-correlation analysis and its application to fault diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 41 (1–2). P. 141–154. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.08.004>.
7. Ming A. B., Zhang W., Qin Z. Y., Chu F. L. Envelope calculation of the multi-component signal and its application to the deterministic component cancellation in bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 50–51. P. 70–100. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.05.033>.
8. Moumene I., Ouelaa N. Gears and Bearings Combined Faults Detection Using Hilbert Transform and Wavelet Multiresolution Analysis. Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations Proceedings of the Second International Conference “Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations” CMMNO’2012. 2012. P. 319–328. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-28768-8_34.
9. Qiu H., Lee J., Lin J., Yu G. Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 289(4–5). P. 1066–1090. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.007>.
10. Rafiee J. M., Rafiee A., Tse P. W. Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37(6). P. 4568–4579. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.051>.
11. Rafiee J. M., Tse P. W. Use of autocorrelation of wavelet coefficients for fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23(5). P. 1554–1572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.02.008>.
12. Shin K., Hammond J. K. Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers: John Wiley & Sons Ltd, 2008. P. 403.
13. Tse P. W., Yang W-X., Tam H. Y. Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 2004. Vol. 277(4–5). P. 1005–1024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.09.031>.

14. Zheng K., Li T., Zhang B., Zhang Y., Luo J., Zhou X. Incipient fault feature extraction of rolling bearings using autocorrelation function impulse harmonic to noise ratio index based SVD and teager energy operator. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7(11). P. 1117–1135. URL: <https://doi.org/10.3390/app7111117>.

Пузир Володимир Григорович, д-р техн. наук, завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-19-98.

E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

Михалків Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-20-16.

E-mail: svm_m@kart.edu.ua.

Ходаківський Андрій Миколайович, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: khodakivski@gmail.com.

Бульба Владислав Ігорович, інженер, регіональна філія «Південна залізниця». E-mail: bulbass@i.ua.

Puzyr Volodymyr, D.Sc. (Tech). Professor, Head of the Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-19-98. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com.

Mykhalkiv Serhii, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-20-16. E-mail: svm_m@kart.edu.ua.

Khodakivskiyi Andrii, Senior Lecturer, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: khodakivski@gmail.com.

Bulba Vladyslav, Engineer of the Regional branch “Southern Railway”. E-mail: bulbass@i.ua.

Статтю прийнято 24.06.2019 р.