УДК 629.488.27:621.822.614:620.179

# ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ

**А.В. Погребняк, доц., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, С.В. Михалків, доц., к.т.н., А.В. Євтушенко, доц., к.т.н., Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків**

***Анотація.*** *Коротко подано опис особливостей використання алгоритму безперервного вейвлет-перетворення. Розроблено модель технології вібродіагностування підшипників кочення.*

***Ключові слова:*** *вейвлет-аналіз Морле, діагностичні ознаки, технологія діагностування, функціонально-логічна модель, підшипники кочення.*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

**А.В. Погребняк, доц., к.т.н., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, С.В. Михалкив, доц., к.т.н., А.В. Евтушенко, доц., к.т.н., Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков**

***Аннотация.*** *Кратко описаны особенности использования алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования. Разработана модель технологии вибродиагностирования подшипников качения.*

***Ключевые слова:*** *вейвлет-анализ Морле, диагностические признаки, технология диагностирования, функционально-логическая модель, подшипники качения.*

# USE OF WAVELET-ANALYSIS FOR AIMS OF VIBRODIAGNOSTICATING OF BEARING KNOTS

**A. Pogrebnyak, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), Kharkiv National Automobile and Highway University, S. Mykhalkiv, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), A. Evtushenko, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv**

***Abstract.*** *The features of using the of algorithm of continuous wavelet transformation are briefly described. A model technology of vibrodiagnosticating woobling bearing is developed.*

***Key words:*** *wavelet analysis of Morle, diagnostic signs, technology of diagnosticating, functionally-logical model, woobling of bearing.*

## Вступ

При аналізі стаціонарних сигналів, як правило, буває достатнім застосування спектрального аналізу на основі алгоритму швидкого перетворювання Фур’є (ШПФ). Основні недоліки при цьому такі: збільшення відношення сигнал-шум, унаслідок усереднення та синхронного накопичення; невисока роздільна здатність аналізу у високочастотній області, що вимагає застосування процедур детектування в рамках детермінованого підходу (аналізу огинаючої) [3]. Традиційний спектральний аналіз є недостатнім для нестаціонарних сигналів із часовим масштабом нестаціонарності, який набагато менший за тривалість реалізації, яка підлягає аналізу. Це пов’язано з усередненням потужності флуктуації при спектральному аналізі (спектр потужності) протягом усього часу спостереження за сигналом.

Найбільш очевидним шляхом застосування алгоритму ШПФ щодо аналізу нестаціонарних сигналів є розбивка реалізації на окремі короткі ділянки з однаковою довжиною з наступним залученням алгоритму ШПФ до кожного з них. Цей прийом широко відомий у практиці аналізу сигналів як ШПФ на коротких реалізаціях (Short time FFT). Відмінною рисою аналізу на коротких реалізаціях є необхідність використання вікон, що згладжують (наприклад, вікон Хеммінга, Ханна, вікна «flat-top» та ін.). Як відомо, без них підсилюється вплив ефекту розтікання дискретних складових у бічні пелюстки. Обмежена кількість ділянок розбиття (кількість спектрів) обмежує роздільну здатність аналізу в часовій області, тому в подальшому було запропоновано низку алгоритмів аналізу із ковзними вікнами та вікнами, що усереднюють і згладжують. Їх застосування дає змогу істотно збільшити роздільну здатність аналізу в часовій області при збереженні досить високої роздільності в частотній області, однак цей факт супроводжується значним обсягом обчислень.

Термін вейвлет (wavelet – коротка хвиля) ввели Гроссман (Grossman) і Морле (Morlet) [126] у середині 80-х років XX століття у зв'язку з аналізом властивостей сейсмічних та акустичних сигналів. У наступному десятиріччі теорія вейвлетів інтенсивно розвивалася рядом дослідників (Добеші, Мейер, Малла, Фаржом, Чуі).

Вейвлети – це узагальнена назва функцій певної форми, локалізованих по осі аргументів (незалежних змінних), інваріантних щодо зсуву та лінійних щодо операції масштабування (стискування/розтягування), які мають вигляд коротких хвильових пакетів із нульовим інтегральним значенням. Вони створюються за допомогою спеціальних базових функцій, які визначають їхній вигляд і властивості. За локалізацією в часовому й частотному поданнях вейвлети посідають проміжне положення між гармонічними (синусоїдальними) функціями, локалізованими за частотою, та функцією Дірака, локалізованою у часі.

Широке використання як базису розкладання гармонічних функцій (розкладання Фур'є) створює ілюзію його одиничності. Однак нині існує необхідність використання в багатьох випадках інших базисів розкладання, наприклад, розкладання в базисах функцій Уолша або Хаара. Вейвлет-декомпозиція має розглядатися як один із методів аналізу в нетрадиційному базисі з певними принциповими перевагами.

## Аналіз публікацій

Нині одним із основних факторів, що обмежують розвиток вібродіагностування, є недостатня кількість інформації щодо нових методів обробки сигналів серед інженерного персоналу. Складний математичний апарат частотно-часового аналізу та відсутність програмного забезпечення стримують використання цих підходів. Огляд літературних джерел, пов'язаних із обробкою різних типів сигналів, дає змогу вважати найбільш прийнятним і перспективним для подальшого застосування у вібродіагностуванні математичний апарат вейвлет-аналізу [2–4]. Виходячи з вищедоведеного, сформульовано мету та задачі.

## Мета і постановка завдання

Метою дослідження є підвищення ефективності вібродіагностування несправностей елементів підшипників кочення електричних двигунів на різних стадіях розвитку, забезпечення принципу нерозривності процесу вібродіагностування.

Виходячи з цього, у статті розглянуто методи вібродіагностування підшипникових вузлів електродвигунів із застосуванням вейвлет-аналізу для цілей вібродіагностування підшипникових вузлів.

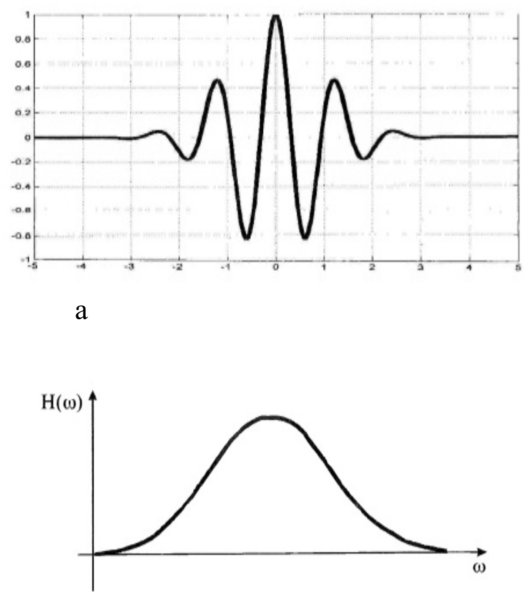
## Особливості використання алгоритму безперервного вейвлет-перетворення

У той час, як у перетвореннях Фур'є значення сигналу містять вагові коефіцієнти, в показнику ступеня яких стоїть уявна частина, а аргумент є гармонічним і залежить від частоти, тобто є синусоїдальним членом, у вейвлет-перетворенні ваговими коефіцієнтами значень сигналу постають вейвлет-функції [1]. Усі вейвлет-функції виходять із основної (материнської, базової) вейвлет-функції. Існує низка можливих материнських функцій, обраних для отримання таких властивостей. Вони повинні: осцилювати, бути смуговими, швидко спадати у часі до нуля і бути зворотними. Остання властивість гарантує, що вейвлет-перетворення сигналу буде однозначним. Морлетівська, або модифікована гаусова материнська вейвлет-функція (вейвлет Морле) визначається як

$$\psi\left(t\right)=e^{iw_{0}t}e^{-t^{2}/2}, \qquad (1)$$

Фур'є-образ (рис. 1) якої

$$H\left(\omega\right)=\sqrt{2\pi e^{-\left(\omega-\omega_{0}\right)^{2}/2}}\ . \qquad (2)$$




а

б

Рис. 1. Часове та частотне подання вейвлету Морле: а – материнська вейвлет-функція Морле; б – Фур'є-образ вейвлет-функції Морле

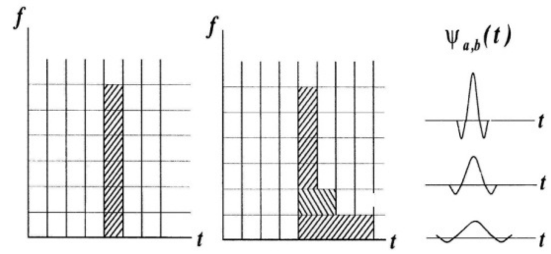
Функція $\psi(t)$ задовольняє зазначеним вимогам, тобто осцилює і спадає до нуля. Інші (дочірні) функції отримують відповідною зміною масштабу материнскої функції для створення родини функцій. Кожна дочірня функція визначається як

$$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left\{(t-\tau)/a]\right\}, \qquad (3)$$

де $a$ – змінний коефіцієнт масштабування; $\tau$ – константа переносу.

Якщо масштаб $a$ збільшується, то амплітуда й аргумент функції зменшуються. Зменшення аргументу за заданої амплітуди означає, що зменшується частота. Отже, збільшення масштабу $a$ відповідає зменшенню частоти, і тому функція розширюється в часовій області по горизонталі. Позитивні значення константи переносу призводять до переміщення функції вздовж позитивної часової осі. Таким чином, сигнали із різними частотними компонентами, розташованими в різних проміжках часу, можна описувати як суму різних вейвлет-функцій.

Відмітною особливістю вейвлет-аналізу є його висока чутливість до короткочасних високочастотних флуктуацій сигналу, тому що вейвлет-вікно забезпечує адекватну оцінку таких флуктуацій за рахунок одночасного збільшення амплітуди вікна за зменшення його ширини (рис. 2). У зв'язку з вейвлет-аналізом часто згадують принцип невизначеності Гейзенберга. Роздільна здатність аналізу в часовій області зростає зі зростанням частоти. У цьому полягає принципова відмінність вейвлет-аналізу від перетворення Фур'є на коротких реалізаціях, де використовується фіксоване вікно і, відповідно, фіксована роздільність за частотою і за часом для усіх точок площини перетворення, і не може бути адаптоване до локальних властивостей сигналу.




а б

Рис. 2. Ґрати дискретних станів ($f$, $t$) залежно від типу перетворення: а – роздільна здатність перетворення Фур'є; б – родільна здатність вейвлет-перетворення

Вейвлет-перетворення створює прогресію зі зростаючою дискретизацією. Встановлюється, що сигнал $s(t)$ є квадратично інтегрованим

$$\int s^{2}(t)dt<\infty. \qquad (4)$$

Безперервне вейвлет-перетворення (БВП) $(a, \tau)$ визначається як

$$\text{БВП}\ (a,\tau)=(1/\sqrt{a})\int s\,(t)\psi\{(t-\tau)/a\}dt. \qquad (5)$$

Параметри цього рівняння (5) можна дискретизувати, що дасть вейвлет-перетворення із дискретними параметрами (ВПДП) ($m, n$)

$$\text{ВПДП}\left(m,n\right)=a_0^{-m/2}\int s\left(t\right)\psi\{(t-n\tau_o a_0^m)/a_0^m\}dt \quad (6)$$

з відповідними замінами, $a = a_0^m$, $\tau = n\tau_o a_0^m$, де $a_o$ і $\tau_o$ – інтервали дискретизації для $a$ і $\tau$, $m$ та $n$ – цілі числа. Часто обирають, $a_o = 2$, а $\tau_o = 1$. Тоді

$$\text{ВПДП}\left(m,n\right)=2^{-m/2}\int s\left(t\right)\psi\{(t-n2^m)/2^m\}dt = 2^{-m/2}\int s\left(t\right)\psi\{(2^{-m}t-n\}dt \quad (7)$$

Це розширює часову вісь в $2^{-m}$ рази, а вейвлет-функція переноситься в позитивну сторону в часі на $2^m n$.

Дискретизація у часі дає вейвлет-перетворення із дискретним часом (ВПДЧ) ($m$, $n$)

$$\text{ВПДЧ}\left(m,n\right)=a_0^{-m/2}\sum_k s(k)\psi(a_o^{-m}k-n\tau_o)\,. \quad (8)$$

Якщо взяти $a_o = 2$, а $\tau_o = 1$, то (ВПДЧ) ($m, n$) набуде вигляду

$$\text{ВПДЧ}\left(m,n\right)=2^{-\frac{m}{2}}\times\sum_k s\left(k\right)\psi(2^{-m}k-n). \quad (9)$$

Вираз відомий як дискретне вейвлет-перетворення. На думку низки авторів, зокрема В.П. Дьяконова [6], доцільно називати вираз (9) недискретним вейвлет-перетворенням, який є особливим різновидом БВП (безперервне вейвлет-перетворення) і дає змогу усувати надлишковість останнього.

## Дослідження застосування алгоритму швидкого вейвлет-перетворення

Під час аналізу сигналів корисно їх подання у вигляді сукупності послідовних наближень грубої (апроксимуючої) $A_m(t)$ та уточненої (деталізованої) $D_m(t)$ складових

$$S\left(t\right)=A_m\left(t\right)+\sum_{j=1}^{m}D_j(t) \quad (10)$$

із наступним їх уточненням ітераційним методом. Кожен крок уточнення відповідає певному масштабу $a^m$ (тобто рівню $m$) аналізу (декомпозиції) і синтезу (реконструкції) сигналу. Таке подання кожної складової сигналу вейвлетами можна розглядати як у часовій, так і в частотній областях. У цьому полягає сутність кратномасштабного аналізу (КМА). Припустимо, що існує безперервний сигнал $S(t)$ $V_o$. Дискретний сигнал $S_д$ інтерпретуємо як послідовність коефіцієнтів $a_k$, отриманих в ході КМА сигналу $S(t)$ з функціями $\varphi_{ok}(t)$, що масштабують

$$S\left(t\right)=A_o\left(t\right)=\sum_k a_{ok}\varphi_{ok}\left(t\right), \quad (11)$$

де $a_{ok} = a_k = (S(t), \varphi_{ok}(t))$ – коефіцієнти апроксимації на рівні $m = 0$.

За концепцією КМА, сигнал $S(t)$ декомпозується на дві складові (які належать підпросторам $V_1$ та $W_1$)

$$S\left(t\right)=A_1\left(t\right)+D_1\left(t\right)=\sum_k a_{1k}\varphi_{1k}\left(t\right)+\sum_k d_{1k}\psi_{1k}\left(t\right). \quad (12)$$

Відповідно отримані дві нові послідовності $a_{1k}$ та $d_{1k}$, які мають половинну довжину порівняно з $a_{ok}$. Далі процес декомпозиції може бути продовжений за $A_1(t)$. Сигнал $S(t)$ на рівні декомпозиції $m$ буде поданий сукупністю коефіцієнтів $a_{mk}$ та $d_{mk}$.

Однак обчислення $a_{mk}$ та $d_{mk}$ залежать від безперервних базисних функцій $\varphi(t)$ та $\psi(t)$. Як показано в [5], ці функції однозначно визначаються коефіцієнтами $h_l$

$$\varphi\left(t\right)=2\sum_l h_l\varphi(2t-l)\,, \quad (13)$$

$$\psi\left(t\right)=2\sum_l\left(-1\right)^l h_{1-l}\varphi\left(2t-l\right)=2\sum_l g_l\varphi(2t-l), \quad (14)$$

$$h_l = (\varphi(t), \varphi(2t-l)), \quad (15)$$

$$g_l = (-1)^l h_{2n-1-l}, \quad (16)$$

де $l = 0, 1, \ldots., l_o = 2n - 1$, $n$ – порядок вейвлета. Вейвлети $n$-го порядку існують лише на інтервалі $2n - 1$ і мають $2n$ коефіцієнтів $h_l$, які відрізняються від нуля.

Із (13) та (14) можна отримати такі відношення

$$a_{mk} = \left(S(t), \varphi_{mk}(t)\right) = \sum_l h_{l-2k} \left(\varphi(t), \varphi_{m-1,l}(t)\right) = \\ = \sum_l h_{l-2k} a_{l,m-1}, \qquad (17)$$

$$d_{mk} = \left(S(t), \psi_{mk}(t)\right) = \sum_l g_{l-2k} \left(\varphi(t), \varphi_{m-1,l}(t)\right) = \\ = \sum_l g_{l-2k} a_{l,m-1}. \qquad (18)$$

Ітераційна процедура швидкого вейвлет-аналізу дістала назву аналізу від «тонкого» до «грубого» масштабу.

На практиці найменший можливий масштаб (найбільший рівень роздільності $n_o$) визначається кількістю $N$ дискретних значень сигналу. На «найтоншому» значенні масштабу ($m = 2$, $a = 2^m = 1$) як апроксимуючі коефіцієнти $a_{ok}$ застосовуються самі відліки $S_i$ сигналу $S(t)$, тобто $a_{ok} = S_i$, $k = i$, $i = 0, 1,…., N - 1$. Під час переходу від поточного масштабу $m$ до наступного $m + 1$ число вейвлет-коефіцієнтів зменшується у два рази і вони визначаються за рекурентним співвідношенням

$$a_{m+1,k} = \sum_l h_{l-2k} a_{ml}, \quad d_{m+1,k} = \sum_l g_{l-2k} a_{ml}. \qquad (19)$$

Процес зупиняється після кінцевої кількості рівнів $m$ = MAX, які залежать від тривалості сигналу ($N$) і порядку ($l$) фільтра $h_l$.

Під час відновлення (реконструкції) сигналу за його вейвлет-коефіцієнтами процес проходить від крупних масштабів до дрібних і на кожному кроці описується виразом

$$a_{m-1,k} = \sum_l (h_{k-2l} a_{ml} + g_{k-2l} d_{ml}), \qquad (20)$$

який береться зі співвідношень (13) та (14).

Кількість операцій множення під час прямого швидкого вейвлет-перетворення (ШВП) буде $2LN$, де $L = 2n$. Така ж кількість операцій необхідна і для реконструкції сигналу. Таким чином, для аналізу-синтезу сигналу в базисі вейвлетів необхідно виконати $4LN$ операцій, що не перевищує і навіть менше кількості операцій для ШПФ ($N\log_2 N$).

**Розробка моделі технології вібродіагностування підшипників кочення**

Основою вібродіагностування є два основних компоненти – знання віброметрії, тобто що і як вимірювати, а також знання об'єкта діагностування – що потрібно діагностувати. На їх основі будується відповідна система розпізнавання технічних станів, яка пов'язує вібраційні характеристики з видами несправностей конкретних типів об'єктів. Ця система розпізнавання називається моделлю діагностування. Вона може бути реалізована у вигляді деякого набору вирішальних правил (агоритмів), формалізованих у вигляді діагностичних програм. Діагностування базується на загальній статистичній теорії виявлення та оцінювання. Його завдання полягає у виявленні пошкоджень та оцінюванні стану об'єкта як з кількісної сторони, так і з якісної. Вібродіагностування – це частина діагностування, що використовує як джерело діагностичної інформації вібраційні процеси, що надходять від різних вузлів і механізмів, що діагностуються. У роботі запропоновано функціонально-логічну модель діагностування підшипників кочення за вібраційними характеристиками (рис. 3), яка поєднує характерні риси двох загальновживаних підходів (детермінованого та стохастичного) та із використанням вейвлет-аналізу.

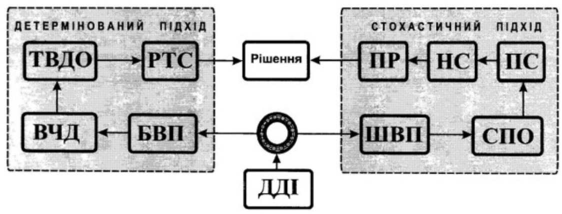



Рис. 3. Функціонально-логічна модель технології вібродіагностування підшипників кочення

У рамках детермінованого підходу запропоновано алгоритм БВП (безперервне вейвлет-перетворення) із використанням вейвлету Морле для побудови частотно-часових вейвлет-спектрограм із подальшим виділенням частотних діапазонів (ВЧД) із дискретними складовими, які порівнюють із теоретично визначеними діагностичними ознаками (ТВДО) елементів підшипника кочення, що дає змогу проводити розпізнавання технічного стану (РТС) підшипників кочення.

Стохастичний підхід передбачає використання алгоритму ШВП у рамках КМА для виділення інформативних частотних діапазонів. Статистичне оцінювання вібраційних характеристик досліджуваного процесу, виділених завдяки використанню ШВП, хоча і дає змогу проводити вібродіагностування з необхідною точністю, однак є тільки першим етапом цього процесу, оскільки не супроводжується оцінками статистичної достовірності й зазвичай закінчується отриманням кількісної оцінки параметрів досліджуваних вібраційних процесів.

Найпростіша задача стохастичного діагностування, в основі якої завжди лежить деяка імовірісна модель процесу, що спостерігається, складається з певних основних елементів. Перший елемент – джерело діагностичної інформації (ДДІ), яке створює деякий процес, що залежить від діагностичних параметрів, кожен з яких може бути скаляром або вектором. У найпростішому випадку розглядається лише один параметр, який може набувати двох різних значень. Із появою кожного значення пов’язуються взаємовиключні гіпотези: основна $H_0$ та альтернативна, або конкуруюча $H_1$. У складнішій ситуації досліджуваний параметр може набувати кінцевої кількості значень. При цьому один вектор зазвичай розглядається як одне значення векторного параметра. У такому випадку існує багатоальтернативна ситуація і $H_0$ завжди вважається основною (нульовою) гіпотезою, а всі інші – альтернативними. Апріорі невідомо, яка саме гіпотеза є вірною щодо об’єкта, який діагностується.

Другим елементом є статистична попередня обробка (СПО), яка проводиться таким чином, начебто вже відомо, яка гіпотеза має місце. Ґрунтуючись на такому знанні, отримують певну точку у просторі спостережень. Передбачається, що на цьому етапі додається деяка незалежна від гіпотез адитивна випадкова компонента, яка може виникати як на виході джерела діагностичної інформації, так і у процесі її статистичної обробки. Вона спотворює значення діагностичного параметра, тому із кожним гіпотетичним значенням параметра пов’язується імовірнісний закон розподілу, який однозначно відповідає кожній із зазначених вище гіпотез.

Простір спостережень (ПС) є третім елементом. У результаті дії перешкод у просторі спостережень безліч точок, які відповідають різним гіпотезам, перетинаються, а іноді повністю співпадають. Тому виникає необхідність розбити весь простір спостережень на підмножини, що не перетинаються, – образи, які відповідають кожній із гіпотез.

Навчальні сукупності (НС) – це безліч тих значень параметрів, які характерні для умовно справного стану вузла, який діагностується, або його станів, пов’язаних із наявністю одної з несправностей, що діагностується. Не маючи у розпорядженні таких сукупностей, у принципі неможливо побудувати вирішальне правило, а значить, не можна провести діагностування описаним вище способом. Навчальні сукупності можуть перетинатися, що найчастіше відбувається на практиці.

Процес експериментальної побудови навчальних сукупностей в діагностуванні називають навчанням. Від його результатів значною мірою залежить достовірність діагностування, тому що на його основі здійснюється розрахунок і планування всього експерименту з діагностування. Саме у процесі навчання формуються образи технічних станів підшипникових вузлів, а також будуються оцінки імовірнісних законів, за допомогою яких здійснюється формулювання гіпотез і попередня статистична обробка діагностичної інформації.

Четвертий елемент – правило рішення (ПР), яке будується із урахуванням навчальних сукупностей і є оптимальною розбивкою певним чином перетвореного простору спостережень на підмножини, що перетинаються, і визначає гіпотезу, тобто вирішує завдання діагностування.

## Висновки

Використання алгоритму БВП дає змогу уникати недоліків традиційного математичного апарату спектрального аналізу, який, внаслідок невисокої роздільної здатності у високочастотному діапазоні, застосовує складний метод побудови спектра огинаючої вібрації із притаманною йому властивістю усунення малого часового масштабу нестаціонарності досліджуваних реалізацій.

### Література

1. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. Береговой А.И. Вибродиагностика электрических машин. Статистический подход и устройство / А.И. Береговой, А.Ф. Быстриков, Н.Н. Котвицкий. – К., 1984. – 56 с. (Препр./АН УССР. Ин-ут электродинамики. 364).
3. Погребняк А.В. Совершенствование методики диагностирования подшипников тепловозных турбокомпрессоров по вибрационным характеристикам: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / А.В. Погребняк. – Днепропетровск, 1990 – 164 с.
4. Тартаковский Э.Д. Совершенствование технологии диагностирования подшипников качения по вибрационным характеристикам / Э.Д. Тартаковский, Е.А. Игуменцев, А.В. Погребняк // Сб. тр. ХИИТ. –1990. – № 5135. – 20 с.
5. Яковлев А.Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов / А.Н. Яковлев. – С.Пб.: Питер, 2003. – 128 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В.П. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 576 с.

Рецензент: В.Д. Мигаль, професор, д.т.н., ХНАДУ.