

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕЙВЛЕТІВ

В роботі досліджено можливість безперервного вейвлет-перетворення щодо визначення частотних характеристик нестационарних сигналів. Вейвлет-перетворення сигналу розглянуто з точки зору фільтрації. Досліджено викривлення, що вносяться вейвлет-перетворенням в результати аналізу при дослідженні коротких сигналів. Наведено метод зменшення граничних ефектів при виконанні вейвлет-перетворення сигналів. Обґрунтовано вибір типів вейвлетів для аналізу технічних сигналів. Розроблено метод спектрального аналізу нестационарних сигналів з використанням безперервного вейвлет-перетворення. Ефективність методу досліджено при вирішенні практичної задачі вібраційної діагностики вальниць кочення.

Ключові слова: безперервне вейвлет-перетворення, спектральний аналіз, фільтрація, нестационарний сигнал, діагностування.

Вступ

Найбільше широко використовуваним методом обробки цифрових сигналів наразі є перетворення Фур'є. Однак воно має ряд недоліків, які привели до появи й розробки нових удосконалених методів цифрового аналізу нестационарних сигналів. Найбільшим недоліком перетворення Фур'є можна назвати усереднення характерних рис по всій тривалості сигналу, що робить неможливим застосування даного методу при необхідності аналізу змін сигналу в часі.

Для аналізу швидкоплинних нестационарних сигналів доцільно використовувати сучасний математичний засіб вейвлет-перетворення [1 – 3]. Вейвлет-перетворення на сьогодні широко застосовується для аналізу графічних зображень, аудіо та відео даних, різноманітних технічних сигналів тощо. Цей інструмент дозволяє отримати частотно-часове подання сигналу, що аналізується.

В задачах технічної діагностики для визначення стану технічного об'єкту використовується спектральний аналіз складних нестационарних сигналів. Для вирішення задачі технічної діагностики в умовах реального часу постає задача слідкування за частотними характеристиками об'єкту шляхом аналізу коротких послідовностей сигналів.

У разі виконання спектрального аналізу сигналів за допомогою вейвлетів необхідним є дослідження частотних характеристик материнського вейвлету, що використовується для аналізу. Параметри обраного вейвлету та його налаштування можуть суттєво впливати на результати перетворення й можливість їх правильної інтерпретації.

Постановка задачі та мета дослідження. Для успішного застосування вейвлет-перетворення в задачах технічної діагностики складних сигналів необхідно проаналізувати можливості безперервного вейвлет-перетворення для визначення частотних

характеристик нестационарних сигналів, обґрунтувати вибір материнського вейвлету та розробити метод спектрального аналізу сигналів за допомогою вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення сигналу з точки зору фільтрації

Безперервне вейвлет-перетворення – це розклад сигналу, що аналізується, в базисі деякої материнської вейвлетної функції [1-3].

Базис вейвлет-перетворення (ВП) будується шляхом масштабних перетворень та переносів материнського вейвлету $\psi(t)$ с неперервними значеннями базисних параметрів – масштабного коефіцієнту a та параметра зсуву b :

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

де $\Psi_{a,b}(t)$ – дочірній вейвлет базису, t – параметр часу, $a, b \in \mathbb{R}$.

В інтегральній формі ВП безперервного сигналу $s(t)$ може бути подано як:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (2)$$

де $*$ – оператор комплексного спряження.

Використовуючи рівняння Парсеваля, що описує зв'язок між функціями та їхніми образами Фур'є, вираз (2) може бути записаний в альтернативній формі [3]:

$$W(a,b) = \sqrt{a} F^{-1} \left\{ S(f) \Psi^*(af) \right\}, \quad (3)$$

де F^{-1} – оператор зворотного перетворення Фур'є; $\Psi(af)$ – образ Фур'є дочірнього вейвлету; $S(f)$ – образ Фур'є сигналу; f – частота.

Таке подання дозволяє прискорити час виконання вейвлет-коефіцієнтів за рахунок використання швидкого перетворення Фур'є.

Вираз (3) показує, що вейвлет-перетворення може бути розглянуте як спеціальна операція фільтрації з вейвлетом в якості ядра фільтру [3].

Розглянемо особливості вейвлетних фільтрів, використовуючи їхні частотно-часові характеристики [4]. Нехай вейвлет $\psi(t)$ та його образ Фур'є $\Psi(f)$ є функціями-вікнами з центрами t_0 та f_0 , радіусами δ_t та δ_f відповідно. Розмір частотно-часового вікна, що характеризує, роздільну здатність вейвлет-аналізу, дорівнює $4*\delta_t\delta_f$.

При масштабуванні материнського вейвлету радіус вікна дочірнього вейвлету в часовій області збільшується прямо пропорційно масштабу ($a*\delta_t$), а в частотній – радіус вікна зменшується (δ_f/a). Таким чином, ВП надає змінну роздільну здатність в частотно-часовій площині, що дає значну перевагу при аналізі нестационарних сигналів.

Завдяки властивостям зсуву та масштабування материнського вейвлету, кожний дочірній вейвлет в частотній області на масштабі a буде мати ширину вікна, що дорівнює $2*\delta_f/a$, та центральну частоту, що дорівнює f_0/a . Їхнє відношення не залежить від масштабу перетворення і є постійною величиною $2*\delta_f/f_0$, значення якої залежить від параметрів материнського вейвлету.

Таким чином, ВП можна розглядати як операцію смугової фільтрації з постійною добротністю, коли відношення ширини смуги пропускання до центральної частоти фільтру є постійною величиною.

Вибір материнського вейвлету для аналізу технічних сигналів

Серед існуючих вейвлет-функцій, що використовуються в безперервному вейвлет-аналізу, вейвлет сімейства Гауса, а саме вейвлет Морлета вейвлет Мексиканська шляпа (рис. 1), більш за все подібні за формою імпульсним складовим нестационарних сигналів. Цей факт робить Гаусове сімейство вейвлетів найбільш відповідним засобом аналізу таких сигналів [5, 6].

Всі вейвлети сімейства Гауса будуються на основі похідних функції Гауса. Наприклад, принципова різниця між вейвлетом Морле і Мексиканською шляпою в тому, що вейвлет Морле має кращі вибіркові властивості в частотній області, а вейвлет Мексиканська шляпа – в часовій [3]. В силу принципу невизначеності Гейзенберга неможливо отримати ідеальну локалізацію одночасно в частотній та часовій областях.

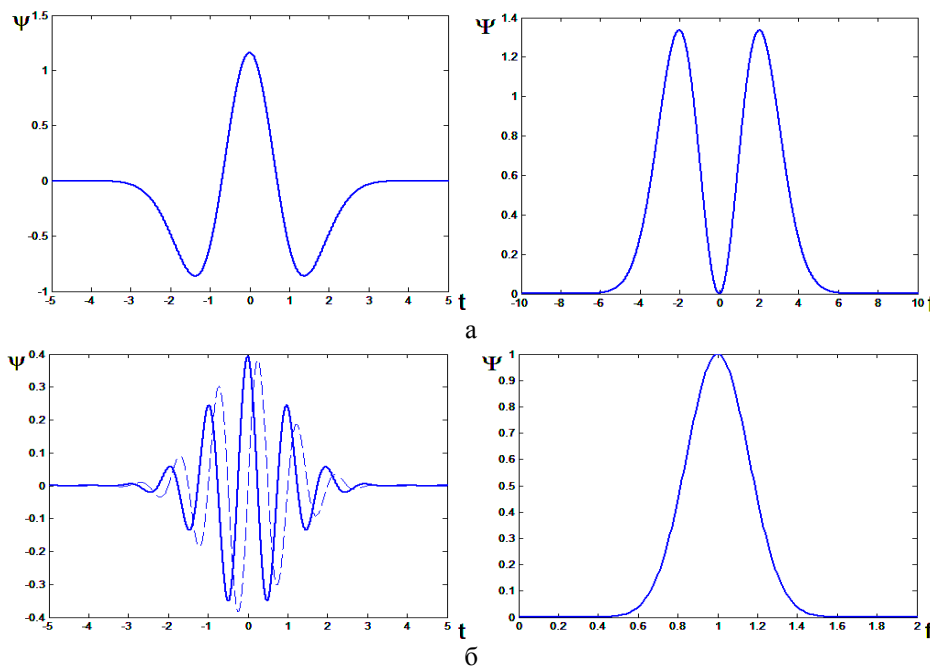


Рис. 1. Вейвлети Морле (а) та Мексиканська шляпа (б)

При виборі вейвлету для аналізу таких нестационарних сигналів як вібраційні сигнали, що використовуються для діагностування технічного стану обладнання з метою виділення із сигналу частотних характеристик дефектів його елементів, перевагу було надано вейлету Морле. Проведене дослідження показало, що присутність домінуючої частоти дозволяє варіювати вибірковість вейвлету Морле в частотній області.

Результати проведеного дослідження та метод аналізу, що приводиться, можуть бути застосовані до будь-якого вейвлету з сімейства Гауса.

В часовій області комплексний вейвлет Морле представляє собою комплексну експоненту, що модулюється функцією Гауса:

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-\sigma^2 t^2} e^{i2\pi f_0 t} \quad (4)$$

де t – час, σ і f_0 – параметри, що задають форму вейвлета; їхній зміст стає зрозумілим в частотному поданні вейвлета.

В частотній області вейвлет Морлема є форму Гаусова вікна з центральною частотою f_0 і шириною σ :

$$\Psi(f) = \Psi^*(f) = e^{-(\pi^2/\sigma^2)(f-f_0)^2} \quad (5)$$

де $\Psi(f)$ – перетворення Фур'є вейвлета Морле, f_0 – центральна частота вейвлета, σ – ширина смуги частот, що аналізується, * – означає комплексне спряження.

Перетворення Фур'є вейвлета Морле дорівнює нулю для відмінних частот, що дозволяє розділити фазові та амплітудні компоненти сигналу при виконанні вейвлет-перетворення.

Таким чином, частотна смуга, що покривається вікном вейвлета Морле, обмежена інтервалом $[f_0 - \sigma/2, f_0 + \sigma/2]$.

На рис. 1, б наведено приклад подання вейвлета Морле в часовій та частотній областях при заданих параметрах $\sigma=0,7$ та $f_0=1$.

Вейвлет Морле не має компактного носія, однак найбільша частина його енергії зосереджена на інтервалі, ширина якого визначається його смугою пропускання. На практиці при $f_0 \gg 0$ вейвлет Морле може бути використаний з мінімальною погрішністю [3].

Граничні ефекти при виконанні вейвлет-перетворення

Область граничних ефектів при виконанні ВП сигналу – це область, у якій значення вейвлет-коефіцієнтів спотворюються розривною природою границь сигналу [6]. Амплітуди вейвлет-коефіцієнтів в цій області порівняні з амплітудами коефіцієнтів, що визначають особливі характеристичні точки сигналу. Найбільш актуальною проблемою зменшення впливу граничних ефектів на результати вейвлет-аналізу стає при обробці коротких високочастотних сигналів в реальному часі. Прикладом такої задачі може слугувати вібраційна діагностика технічного обладнання.

Спотворення значень вейвлет-коефіцієнтів при виконанні перетворення кінцевої часової реалізації довжини N у частотній області зумовлені природою перетворення Фур'є, яке припускає, що аналізований сигнал періодичний і має період довжиною N .

Для зменшення похибки при аналізі вібраційних сигналів пропонується використовувати доповнення часового ряду нулями. Такий підхід дозволяє зменшити амплітуди вейвлет-коефіцієнтів біля границь початкового часового ряду і зсунути неоднорідність, що виникає внаслідок розривів на границях, до області більш високих масштабів, тобто до області низьких частот [3].

Використання для аналізу ряду, в якому довжина послідовності нулів дорівнює довжині початкового сигналу, було обрано оптимальним для аналізу вібраційних сигналів з точки зору балансу швидкості розрахунків і точності вейвлет-коефіцієнтів поблизу границь початкового ряду.

Для зменшення впливу граничних ефектів для безперервного ВП пропонується метод розрахунку області достовірності результатів аналізу, що полягає в наступному.

Використовуючи кут впливу вейвлет-коефіцієнтів [6] можна визначити, що для розрахунку коефіцієнтів розташованих на відстані меншій за $a * \delta_t$ (радіус вікна вейвлета) від границі сигналу необхідні значення сигналу, що виходять за межі ряду. Таким чином, кількість коефіцієнтів з країв сигналу, значення яких мають спотворений характер, може бути задана в такий спосіб:

$$n = a * \delta_t * f_d, \quad (6)$$

де f_d – частота дискретизації сигналу.

Розглянемо в якості прикладу комплексний вейвлет Морле. Радіус вікна вейвлета Морле було визначено за допомогою правила трьох сигм у наступному вигляді:

$$\delta_t = 3 / (\sigma \sqrt{2}). \quad (7)$$

Використовуючи вирази (6)–(7), для вейвлета Морле можна отримати дві області: область достовірності ВПі область, у якій не можна знехатати наявністю граничних ефектів. Пропонується відкидати дану область граничних ефектів при подальшому аналізі коефіцієнтів ВП.

Так як при розрахунку значення вейвлет-коефіцієнту залежить від ряду значень сигналу, довжина якого тим більша, чим більше значення масштабу a , викривлення, що вносяться в результати аналізу збільшуються зі збільшенням масштабу. Це означає, що для низькочастотних вейвлетних фільтрів ця проблема є більш актуальною, чим для високочастотних.

Запропонований метод розрахунку області граничних ефектів безперервного вейвлет-перетворення розширюється й на інші сімейства вейвлетів, зокрема на всі вейвлети сімейства Гауса.

Розглянемо приклад аналізу сигналу за допомогою вейвлета Морле та покажемо результати зменшення викривлень, що можуть вноситися в значення вейвлет-коефіцієнтів (рис. 2).

На рис. 2, а показано вихідний сигнал, що його підлягав аналізу, а на рис. 2, б та рис. 2, в – результати ВП. На цих рисунках лінією позначено розраховану область достовірних вейвлет-коефіцієнтів.

Рис. 2, б ілюструє появу похибок на границях сигналу. Як видно з рис. 2, б, амплітуди вейвлет-коефіцієнтів після перетворення в області граничних ефектів порівняні з амплітудами коефіцієнтів, що визначають особливі точки сигналу. Така ситуація

може призвести до викривлення результатів аналізу і невірного визначення особливих точок сигналу.

На рис. 2, в приведено результати ВП з використанням запропонованого методу зменшення викри-

влень. Результати показують, що похибки зменшилися: амплітуди в області граничних ефектів значно нижче амплітуд коефіцієнтів, що визначають особливі точки сигналу.

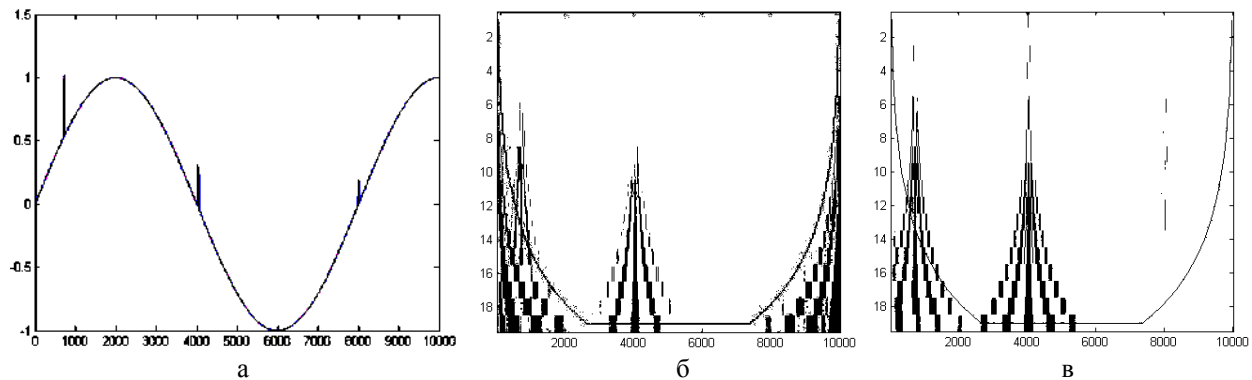


Рис. 2. Ілюстрація граничного ефекту при виконанні вейлет-аналізу: а – сигнал, б – граничний ефект, в – його зменшення

Метод спектрального аналізу сигналів за допомогою вейлет-перетворення

Для розділення частотних компонент сигналів використовують банки фільтрів [7]. Як було відзначено, вейлет-перетворення сигналів можна розглядати як операцію фільтрації з постійною відносною смугою частот. Тому по аналогії зі звичайними гребінками з $1/n$ -октавних смугових фільтрів [7] пропонується побудувати набір аналізуючих вейлет-фільтрів та аналізувати сигнали за наступним алгоритмом.

Етап 1. Задати необхідну кількість фільтрів на октаву ($k = 1, 2, 3, 4, 6, 12$).

Етап 2. Для побудови набору фільтрів із k фільтрами на октаву задати основу для розрахунку масштабів вейлет-перетворення:

$$a_i = (2^{1/k})^i. \quad (8)$$

Етап 3. Параметр добротності обрати таким чином, щоб ширина діапазону кожного фільтра дорівнювала відстані між фільтрами:

$$Q_W = 2^{1/k} - 1. \quad (9)$$

За допомогою цього параметра можна варіювати ширину смуги пропускання фільтрів і ступінь перекриття фільтрів у банку.

Етап 4. Розрахувати параметри фільтрів за допомогою константи Q_W :

$$f_i = f_0 / a_i \text{ та } \sigma_i = f_i Q_W. \quad (10)$$

Для параметру материнського вейлету f_0 максимальним прийнятно значення

$$f_0 = 0.8 * f_{Nyq},$$

де f_{Nyq} – частота Найквіста сигналу.

Етап 5. За допомогою виразу (5) побудувати набір фільтрів.

На рис. 3 показано приклад набору з 6 фільтрів, побудованого за наведеним алгоритмом.

Етап 6. За виразом (3) виконується вейлет-фільтрація сигналу. При цьому використовується розроблений метод зменшення впливу граничних ефектів.

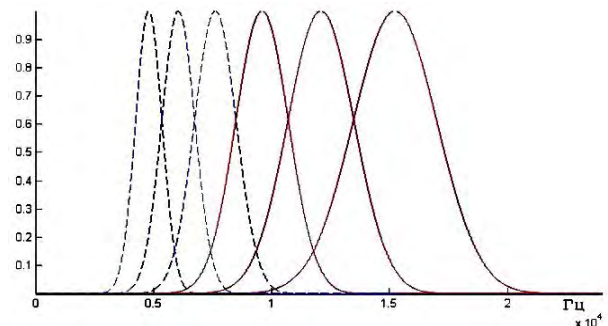


Рис. 3. Набор з 3 фільтрами на октаву, що покриває 2 октави

Завдяки тому, що вейлет Морле є комплексним, вейлет-коефіцієнти, отримані в результаті перетворення на кожному масштабі, є також комплексними значеннями. Реальна частина вейлет-коефіцієнтів $W_{re}(a, b)$ представляє собою відфільтрований сигнал, а мніма частина $W_{im}(a, b)$ – є фазою відфільтрованого сигналу.

Етап 7. Розрахувати модуль вейлет-коефіцієнтів (енергію) за формулою

$$EW(a, b) = [W_{re}(a, b)^2 + W_{im}(a, b)^2]^{1/2}. \quad (11)$$

Даний модуль може бути інтерпретований як обвідна вейлет-перетворення, що дозволяє провести демодуляцію сигналу у необхідному частотному діапазоні [8].

Етап 8. Для аналізу частотних характеристик сигналу пропонується аналізувати спектр обвідної

вейвлет-коефіцієнтів на одному найліпшому масштабі або взаємний спектр на парі масштабів.

У випадку аналізу вібраційних сигналів пропонується розглядати взаємний спектр на перших масштабах, які відповідають фільтрам високих частот. Такий підхід представляє собою модифікацію методу аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації [9].

В якості ознак для вибору одного оптимального фільтра з набору при аналізі вібраційних сигналів пропонується використовувати ексцес коефіцієнтів вейвлет-перетворення для отримання відфільтрованого сигналу з найбільшою імпульсністю [10].

Практичне застосування методу

Розроблений метод було застосовано для вирішення задачі вібраційного діагностування вальниць кочення.

Для визначення дефектів елементів вальниць кочення вібраційний сигнал аналізується з метою виділення характеристичних гармонік, які можуть свідчити проти дефекту та ступінь його розвитку [11, 12]. Складність такого аналізу полягає в тому, що ознаки дефектної вальниці розподіляються на широкій смузі частот, мають малу коливальну енергію, можуть бути зашумлені інформацією з інших вузлів обладнання і носять в деякій мірі випадковий характер.

Чим менший розмір дефекту, тим слабше його ознаки проявляються в сигналі. Нерідко прояв характеристичних частот в звичайному спектрі сигналу починається на останніх стадіях розвитку дефекту [11, 12].

В експериментах вібраційний сигнал знімався з вальниці кочення, що встановлювалась в електродвигун. На елементи вальниці наносилися дефекти.

В табл. 1 наведено розрахункові значення характерних частот вальниці кочення для сигналів, що використовувались в експериментах.

Таблиця 1

Характеристичні частоти вальниці

Характерна частота	Значення, Гц
Швидкість обертання внутрішнього кільця, тобто ротору (F)	29,13
Частота перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю (BPFO)	157,8
Частота перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю (BPF1)	104,4
Частота обертання сепаратора (FTF)	11,6
Частота обертання тіл кочення (BSF)	137,3

Розглянемо на рис. 4 вібраційний сигнал вальниці кочення без дефектів.

Спектр цього сигналу (рис. 5) показує характерну частоту BPFO (157,5 Гц), що повинно свідчити про дефект зовнішнього кільця. Однак тестова вальниця не мала жодних дефектів.

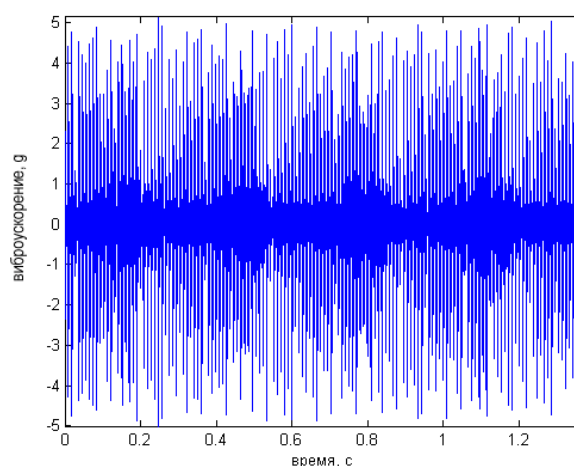


Рис. 4. Вібросигналвальниці без дефекту

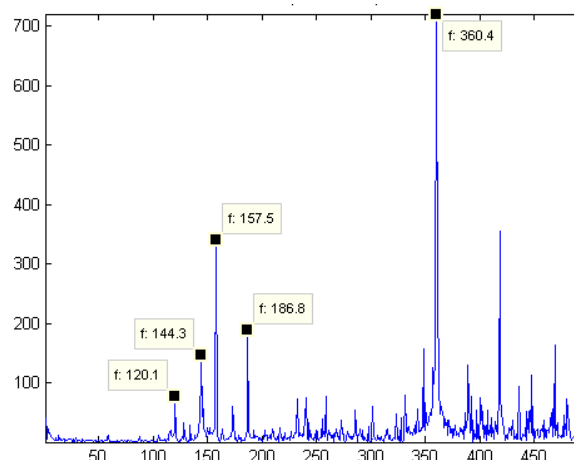


Рис. 5. Спектр сигналу вальниці без дефекту

Розглянемо тепер результат обробки цього сигналу за допомогою запропонованого алгоритму (рис. 6). Як видно, в результаті аналізу ми не бачимо частоти BPFO. При цьому можна отримати деяку додаткову інформацію про стан вальниці: в спектрі присутні гармоніки частоти обертання ротору (від першої до дванадцятої) з високими амплітудами. Це може свідчити про ослаблення механічних з'єднань та може вказувати на наявність внутрішніх зазорів [12].

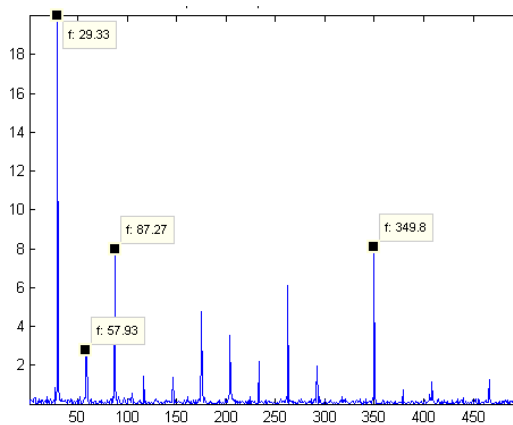


Рис. 6. Спектр сигналу вальниці без дефекту, отриманий за допомогою ВП

Розглянемо сигнал вальниці з дефектом на внутрішньому кільці (рис. 7). Спектр цього сигналу наведено на рис. 8. На спектрі присутня характерна частота ВРФІ (104,7 Гц), однак її амплітуда мала та слабо виражена на фоні інших частотних компонент.

Такий результат не дозволяє з точністю стверджувати про наявність дефекту.

Так як дефект знаходиться на внутрішньому кільці, яке обертається, то він постійно переміщується разом з кільцем і не завжди знаходиться в зоні навантаження.

Тому для діагностування такого виду дефекту необхідно, щоб вибірка сигналу, що аналізується, охопила хоча б один оборот валу [12].

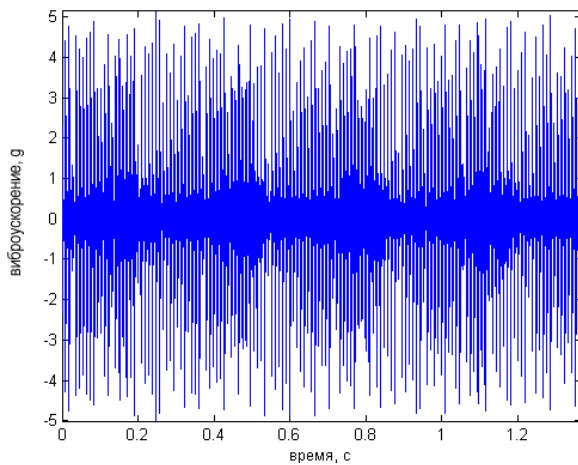


Рис. 7. Вібросигнал вальниці з дефектом на внутрішньому кільці розміром 1,8 мм

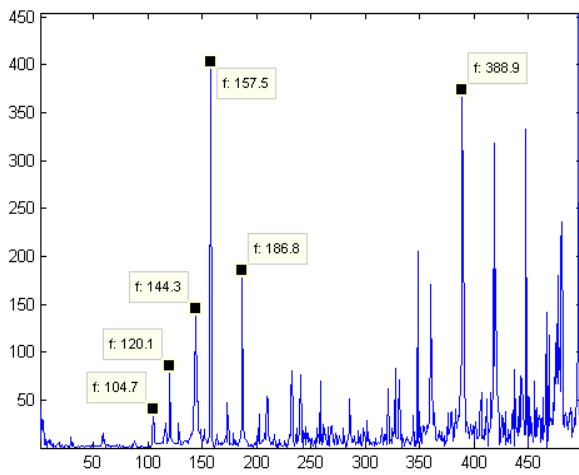


Рис. 8. Спектр сигналу вальниці з дефектом на внутрішньому кільці

Взаємний спектр обвідних ВП на масштабах 1 та 2 (рис. 9) показав максимальне значення амплітуди характерної частоти ВРФІ (104,7 Гц), що відповідає реальному стану вальниці.

Розглянемо тепер випадок дефекту найменшого розміру на зовнішньому кільці вальниці. Сигнал такої вальниці наведено на рис. 10.

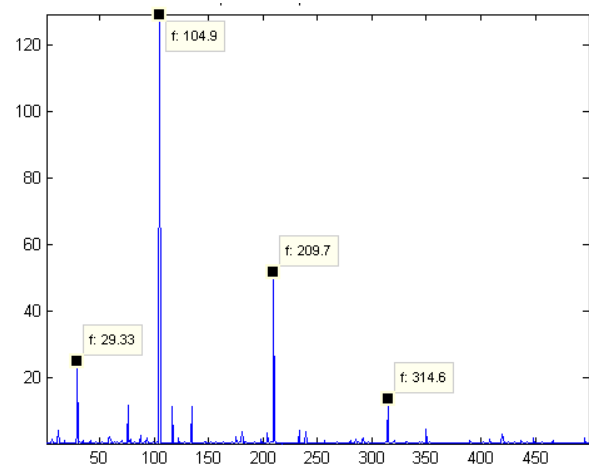


Рис. 9. Взаємний спектр обвідних ВП на масштабах 1 та 2 для вальниці з дефектом внутрішнього кільця

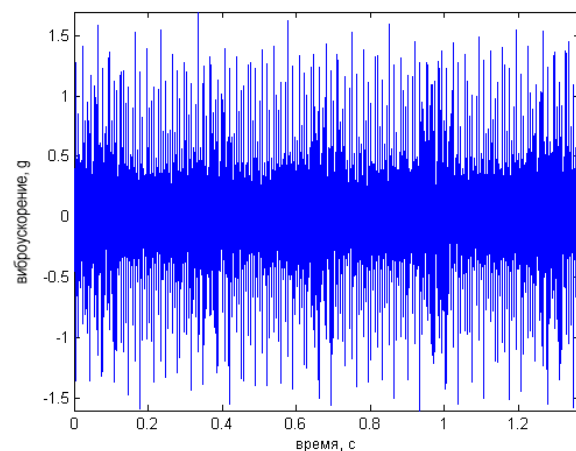


Рис. 10. Вібросигнал вальниці з дефектом зовнішнього кільця розміром 1,8 мм

Спектр сигналу (рис. 11) показує наявність характерної частоти ВРФІ (157,5 Гц).

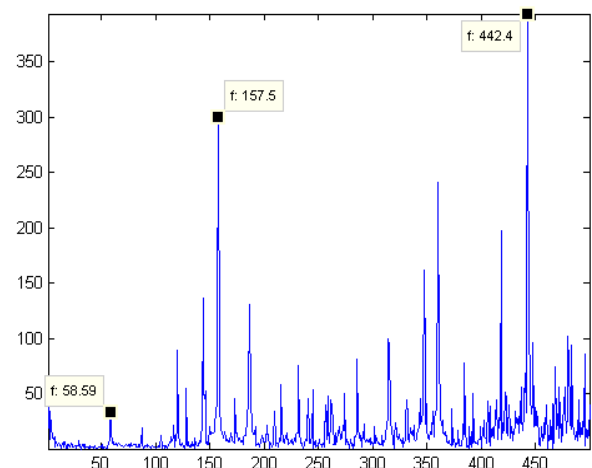


Рис. 11. Спектр сигналу вальниці з дефектом зовнішнього кільця

Не зважаючи на те, що амплітуда цієї частоти на спектрі не мала, це не дозволяє достовірно стверджувати про наявність дефекту, адже ця частота

була присутньою на спектрах сигналу вальниці без дефекту (рис. 5) та вальниці з дефектом внутрішнього кільця (рис. 8).

На рис. 12 наведено результат аналізу за допомогою запропонованого методу. На спектрі явно виражена характерна частота ВРФО (156,9 Гц) та її гармоніки (314,6 Гц і 470 Гц). Крім того в спектрі присутні гармоніки роторної частоти (29,3 Гц). Саму більшу амплітуду при цьому має четверта роторна гармоніка (116,6 Гц). Цей факт свідчить про ослаблення в з'єднаннях, а саме про те, що має місце неплотна посадка корпусу вальниці [12].

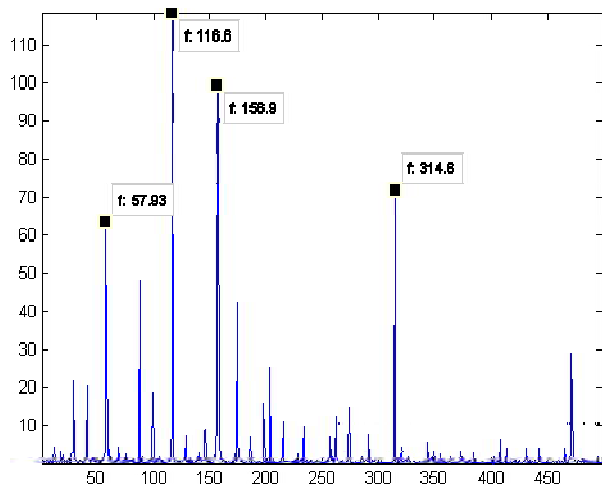


Рис. 12. Взаємний спектр обвідних ВП на масштабах 1 та 3 для вальниці з дефектом зовнішнього кільця

Для більш розвинутих дефектів внутрішнього та зовнішнього кілець вальниці аналіз сигналів за допомогою запропонованого методу дав такі ж саме чіткі ознаки присутності дефектів.

Найбільш складним є діагностування дефектів тіл кочення. З тестових даних тільки дефект найбільшого розміру (5,3 мм) показав себе у вигляді характерної частоти BSF. Це пояснюється тим, що дефект було нанесено лише на одне з дев'яти тіл кочення. Крім того, послідовність ударних імпульсів, що визиваються взаємодією пошкоджених ділянок тіл кочення з кільцями, представляє собою нестационарний випадковий процес [11, 12].

Сигнал вальниці з найбільшим дефектом на одному шарику та його спектр показано на рис. 13, 14. Як видно із результату аналізу цього сигналу, отриманого за допомогою ВП (рис. 15), в спектрі проявився значний поблиз частоти обертання тіл кочення. Дві частоти 131,6 Гц та 140 Гц можуть відповідати або самій частоті обертання тіл кочення ($BSF = 137,3$ Гц) з деякою погрешністю, що пов'язана з неточністю розрахунків, або комбінаторній частоті $BSF-FTF$, яка також свідчить про дефект тіла кочення [12]. Крім того, в спектрі присутня друга гармоніка частоти обертання тіл кочення $2*BSF=265,3$ Гц.

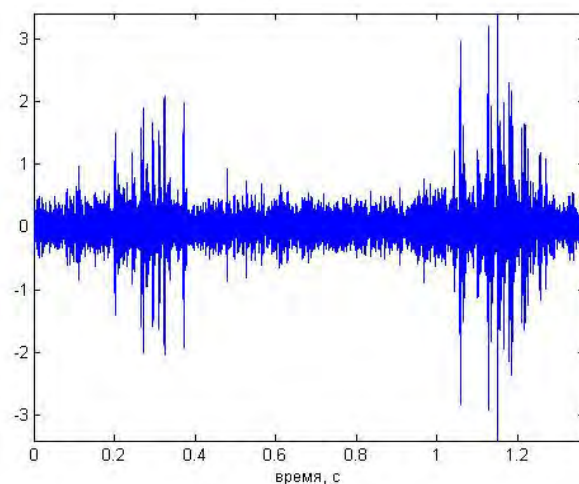


Рис. 13. Вібросигнал вальниці з дефектом на тілі кочення

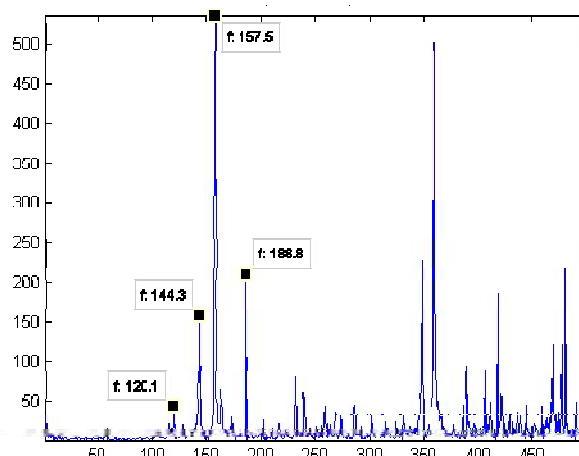


Рис. 14. Спектр сигналу вальниці з дефектом тіла кочення

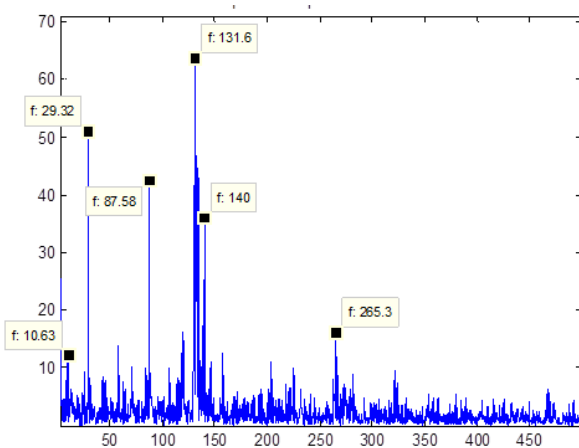


Рис. 15. Взаємний спектр обвідних ВП на масштабах 2 та 3 для вальниці з дефектом тіла кочення

В реальних умовах, якщо в вальниці присутній дефект тіла кочення, він звичайно супроводжується дефектом кільця, і його можна часто спостерігати у вигляді бокових смуг частоти ВРФІ або ВРФО.

Тільки в поодиноких випадках вдається спостерігати саму складову BSF.

Висновки

Таким чином, в роботі запропоновано метод аналізу частотних характеристик нестационарних сигналів, що виконується за допомогою безперервного вейвлет перетворення.

Розроблений метод дозволяє збільшити точність технічного діагностування складних об'єктів. Ефективність методу було опрацьовано при вирішенні задачі вібраційного діагностування вальниць кочення.

При побудові системи аналізу сигналів в реальному часі та налаштуванні набору аналізуючих вейвлетних фільтрів слід враховувати компроміс між вимогами до необхідної точності обробки та опису характеристик сигналу та вимогами до швидкодії системи.

Тому однією з головних задач подальшого дослідження є раціональне налаштування методу обробки сигналу з тим аби за прийнятний час отримати необхідний опис сигналу.

Список літератури

1. Смоленцев Н. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab [Текст] / Н. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс 2014. – 628 с.
2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов [Текст] / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
3. Addison P.S. Illustrated wavelet transform handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance [Text] / Paul S. Addison. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002. – 400 p.

4. Najmi A. The Continuous Wavelet Transform and Variable Resolution Time – Frequency Analysis [Text] / A. Najmi, J. Sadowsky // JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST. – 1997. – Vol. 18, No. 1. – P. 134-140.

5. Ososkov G. Ososkov. Contemporary methods of data processing in experimental physics [Text] / G. Ososkov // Письма в ЭЧАЯ, 2008. – Т. 5. – №3(145). – С. 310-320.

6. Астафьева Н. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения [Текст] / Н. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.

7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. – 2 е издание. – СПб.: Питер, 2006. – 752 с.

8. Andrzej Klepka. Wavelet Based Signal Demodulation Technique for Bearing Fault Detection [Text] / Klepka Andrzej // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15, No. 4. – P. 63-71.

9. Петрухин В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В.В. Петрухин, С.В. Петрухин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. – 168 с.

10. Shir L. Rolling element bearing fault detection using improved envelope analysis [Text] / L. Shir, B. Randall, J. Antoni // IMECHE conference transactions. – 2004. – Vol 2. – P. 301-312.

11. Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. Т.7: В 2 кн., Кн.1; Метод акустической эмиссии. Кн.2: Вибродиагностика // В.И. Иванов, И.Э. Власов, Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова; под общ. ред. В.В. Клюева. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 829 с.

12. Lunn Daniel. Выявлены дефекты подшипников качения с помощью анализа вибрации [Электронный ресурс] / Daniel Lunn; Пер. с англ. И.П. Шейняк, под редакцией В.А. Смирнова. – Режим доступа до ресурса: http://www.vibration.ru/v_defekt.shtml.

Надійшла до редколегії 29.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.І. Гоменюк, Запорізький національний університет, Запоріжжя.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЕЙВЛЕТОВ

Т.В. Юр

В работе исследованы возможности непрерывного вейвлет-преобразования для определения частотных характеристик нестационарных сигналов. Вейвлет-преобразование сигнала рассмотрено с точки зрения фильтрации. Исследованы искажения, вносимые вейвлет-преобразованием в результаты анализа при исследовании коротких сигналов. Приведен метод уменьшения граничных эффектов при выполнении вейвлет-преобразования сигналов. Обоснован выбор типов вейвлетов для анализа технических сигналов. Разработан метод спектрального анализа нестационарных сигналов с использованием непрерывного вейвлет-преобразования. Эффективность метода исследована при решении практической задачи вибрационной диагностики подшипников качения.

Ключевые слова: непрерывное вейвлет-преобразование, спектральный анализ, фильтрация, нестационарный сигнал, диагностирование.

THE METHOD OF DETERMINING THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SIGNALS USING WAVELETS

T.V. Yur

In this work the abilities of continuous wavelet transform to determine the frequency characteristics of non-stationary signals. Wavelet transform of the signal is considered in terms of filtration. The distortions introduced by wavelet transformation in the analysis in the study of short signals are investigated. The method to reduce the side effects when performing wavelet transform of signals is proposed. The choice of types of wavelets to analyze technical signals is grounded. A method for spectral analysis of non-stationary signals using continuous wavelet transform is proposed. The efficiency of research methods is analyzed by solving practical problems of rolling bearings vibration diagnostics.

Keywords: continuous wavelet transform, spectral analysis, filtering, non-stationary signal, diagnostics.