УДК 622.24.058

АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙ ДІЛЯНОК БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-МЕТОДУ

Я.С.Гриджук, А.П.Джус, І.І.Стеліга

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 44277
e-mail: public@nung.edu.ua

В работе изложены основные принципы вэйвлет-анализа вибрационных сигналов, как мощной и современной функции обработки вибросигналов. В краткой форме изложены теоретические основы этого анализа, а также представлен пример его применения в практике анализа вибрации машин.

In work main principles of the wavelet-analysis of vibrating signals, as powerful and modern function of processing of vibrations are stated. In the brief form theoretical bases of this analysis are stated, and also the example of his application in practice of the analysis of vibration of machines is submitted.

Вихідною передумовою пошуку дефектів машин нафтогазового обладнання за параметрами вібрації є те, що вібросигнал, отриманий за допомогою давачів з працюючої машини містить велику кількість інформації про її стан. Для ефективного використання віброконтролю під час діагностування обладнання необхідно, щоб вся інформація з отриманих вібросигналів була відповідним чином оброблена [1, 2]. Під час аналізу стаціонарних сигналів, як правило, достатнім є застосування спектрального аналізу на основі перетворень Фур'є. Основними проблемами при цьому є: збільшення відношення сигнал-шум, яке досягається шляхом усереднення і синхронного накопичення, а також малі можливості застосування цього аналізу у високочастотній області, що вимагає додаткового застосування процедури детектування.

Останнім часом для аналізу даних вібрації почали використовувати інші інтегральні перетворення, зокрема, вейвлет-перетворення (частотні, хвильові), як потужний сучасний метод обробки вібросигналів. З його допомогою можна перейти від спектра вібросигналу, який є двовимірним в частотній області (частота-амплітуда) до тривимірного представлення (час-частота-амплітуда), що значно розширює можливості діагностики [3, 4]. Він застосовується, головним чином, для аналізу нестаціонарних випадкових сигналів, і для багатьох задач подібного типу є більш ефективними, ніж перетворення Фур'є. Основною відмінністю вейвлет-перетворень є розклад даних не по синусоїдах (як для перетворення Фур'є), а по інших функціях, які називаються вейвлетоутворюючими (материнськими). Вейвлетоутворюючі функції, на відміну від безкінечно осцилюючих синусоїд, локалізовані в деякій обмеженій області свого аргументу, а в нескінченності прямують до нуля.

Коротко наведемо основні поняття та функціональні залежності вейвлет-аналізу. В якості вейвлетоутворюючої функції використовують її основний варіант, відомий як функція Морле

$$\psi(t) = e^{i2\pi f_0|t|} \cdot e^{-\frac{|t|^2}{2}}, \qquad (1)$$

де: $f_0 = \dfrac{1}{2\sqrt{ln 2}} \approx 0{,}6\,\text{Гц}$;

t – час.

З математичної точки зору вейвлет-перетворення це ортогональний базис розкладу функцій у функціональному гільбертовому просторі, елементи якого визначаються параметрами a і b та задаються виразом

$$\psi_{a,b} = \pi^{-1/4} |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \qquad (2)$$

де: $a = 2^{-j/B}$ – значення параметра шкали;

$b = 2^{-j/B} k$ – параметр часової реалізації;

j, k – натуральні числа;

B – кількість смуг аналізу, які припадають на октаву.

Коефіцієнти декомпозиції сигналу $x(t)$ в базисі $\psi_{a,b}(\psi_{j,k})$

$$w_{j,k} = \int x(t) \psi^*_{j,k}(t)\, dt, \qquad (3)$$

де:

$$\psi_{j,k}(t) = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} \exp\left[-h^2\left(2^{j/B} n - k\right)^2 / 2\right] \times \times \exp\left(i2\pi f_0 h\left|2^{j/B} n - k\right|\right), \qquad (4)$$

або

$$w_{j,b} = \int x(t) \psi^*_{j,b}(t)\, dt, \qquad (5)$$

де:

$$\psi_{j,b}(t) = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} \exp\left[-2^{2j/B} h^2 (n-b)^2 / 2\right] \times \exp\left(i2\pi f_0 2^{j/B} h|n-b|\right), \qquad (6)$$

h – інтервал між підрахунками.

У виразах (4) і (6) n і b – це цілі числа, що відповідають поточному номеру підрахунку на реалізації і номеру підрахунку, який відповідає максимуму вікна короткої хвилі на реалізації, відповідно. Зірочка означає процедуру комплексного спряження. Аналіз виразів (5) і (6) свідчить, що вейвлет-декомпозиція за відповідного вибору

$$j = B \log_2 (f / f_0)$$

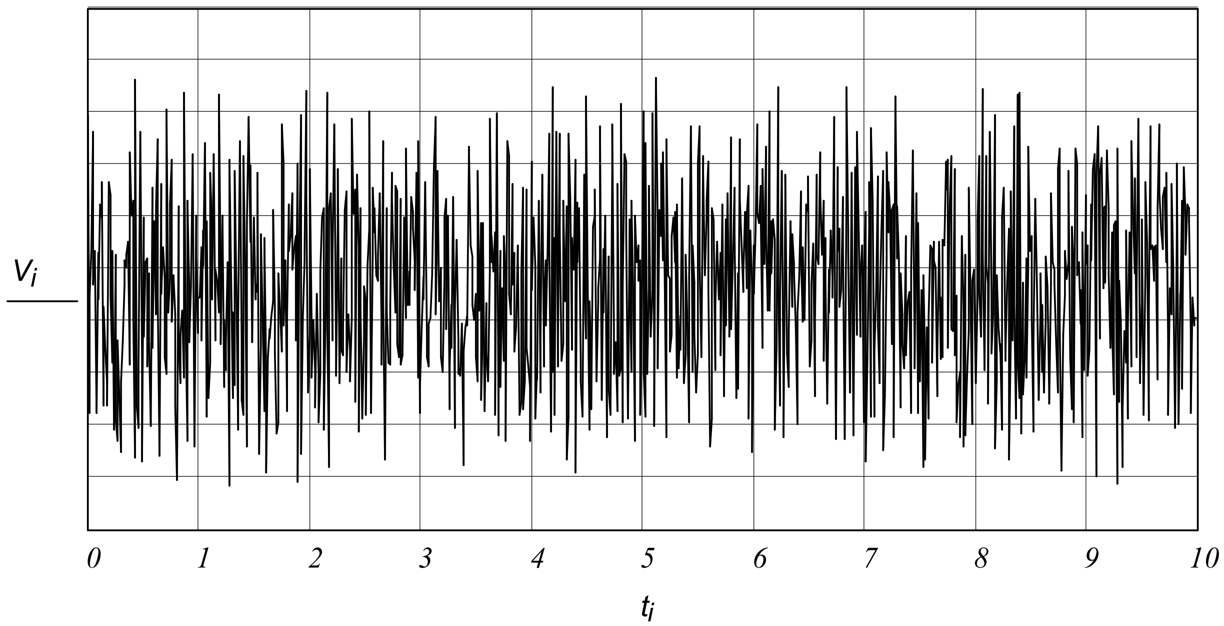

Рисунок 1 – Діаграма вертикальної віброшвидкості ведучої труби бурильної колони

стає аналогічною перетворенню Фур'є на коротких реалізаціях із специфічним нелінійним усереднюючим вікном (вейвлет-вікном)

$$g_{j,b} = \pi^{-1/4} 2^{j/2B} exp\left[-2^{2j/B} h^2 (n-b)^2 / 2\right]. \quad (7)$$

Особливістю вейвлет-аналізу є його висока чутливість до короткочасних високочастотних флуктацій сигналу, оскільки вейвлет-вікно забезпечує адекватну оцінку таких флуктуацій за рахунок одночасного збільшення амплітуди вікна при зменшенні його ширини. Слід зазначити, що при вейвлет-аналізі часто згадують принцип невизначеності Гейзенберга. Можливості аналізу у часовій області збільшуються із збільшенням частоти. В цьому полягає принципова відмінність аналізу даних, проведеного із застосуванням вейвлет-перетворень від перетворень Фур'є на коротких реалізаціях, за якого можливість аналізу в часі не залежить від частоти і пов'язана тільки з можливістю аналізу в частотній області. Якщо під час проведення цифрового Фур'є-аналізу коефіцієнти Фур'є оцінюються як спосіб кореляції сигналу з відповідною нелокалізованою в часі гармонікою, то у випадку вейвлет-аналізу розглядається спосіб кореляції з відповідними локалізованими в часі сплесками частот.

Якщо розглядати варіант октавного аналізу $(B=1)$ в діапазоні частот до 10 кГц з довжиною реалізації $t_н = 10$ с, то інтервал між підрахунками у відповідності із теоремою Найквіста становитиме $h = 100$ мкс, а потужність реалізації складе $Q = 10^{10}$ підрахунків, тоді $j_{min} = 1$, $j_{max} = j = log\left(10^{10}/0{,}6\right) \approx 10$. При $B=1$ співвідношення (5) з врахуванням (6) приводить до виразу

$$w_{j,b} = \sum_{n=b-N/2}^{n=b+N/2} hx(n) g_{j,b}\, exp\left(i2\pi f_0 2^{j/B} h|n-b|\right), \quad (8)$$

де N – частина реалізації Q, яка знаходиться під вікном (6).

Роздільна здатність аналізу в часі залежить від частоти у відповідності з виразом

$$\Delta b_j = 2^{[(j_{max}-j)/B]}. \quad (9)$$

За формулою (9) неважко підрахувати наступні значення: для $j=10$, $\Delta b = 1$, для $j=5$, $\Delta b = 32$, для $j=1$, $\Delta b = 512$, тобто для максимальної частоти потрібно розрахувати найбільшу кількість коефіцієнтів на реалізацію, а для мінімальної – найменшу. При цьому властивість вейвлета є такою, що навіть у октавному варіанті він забезпечує високу чутливість до високочастотних флуктацій сигналу за їх одночасної високої роздільної здатності в часі. Власне через таку властивість вейвлет-аналіз ще інакше називають "частотним мікроскопом".

Якщо розглядати низькочастотні та середньочастотні вібрації в промислових машинах чи механізмах, то вони в основному представляють собою суперпозицію основних і вищих гармонік або суперпозицію вузькосмугових процесів з кратними частотами. Тому для адекватної оцінки амплітуд цих гармонік під час аналізу в цих частотних областях необхідно забезпечити велику роздільну здатність аналізу по частоті. Цього можна досягнути шляхом використання кратного октавного аналізу (1/3-октавного, 1/6-октавного, 1/12-октавного). При цьому в стільки ж разів збільшуються і обсяги розрахунків.

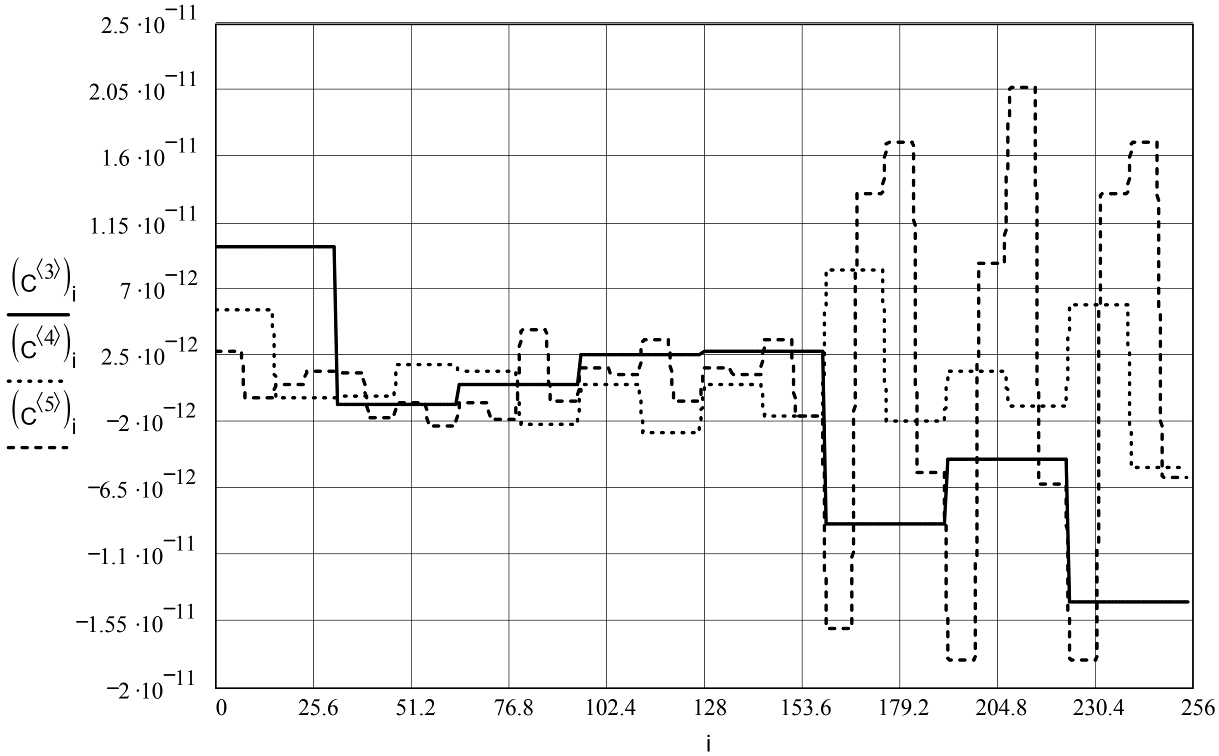

Рисунок 2 – Вейвлет-спектр на основі функції Добеші

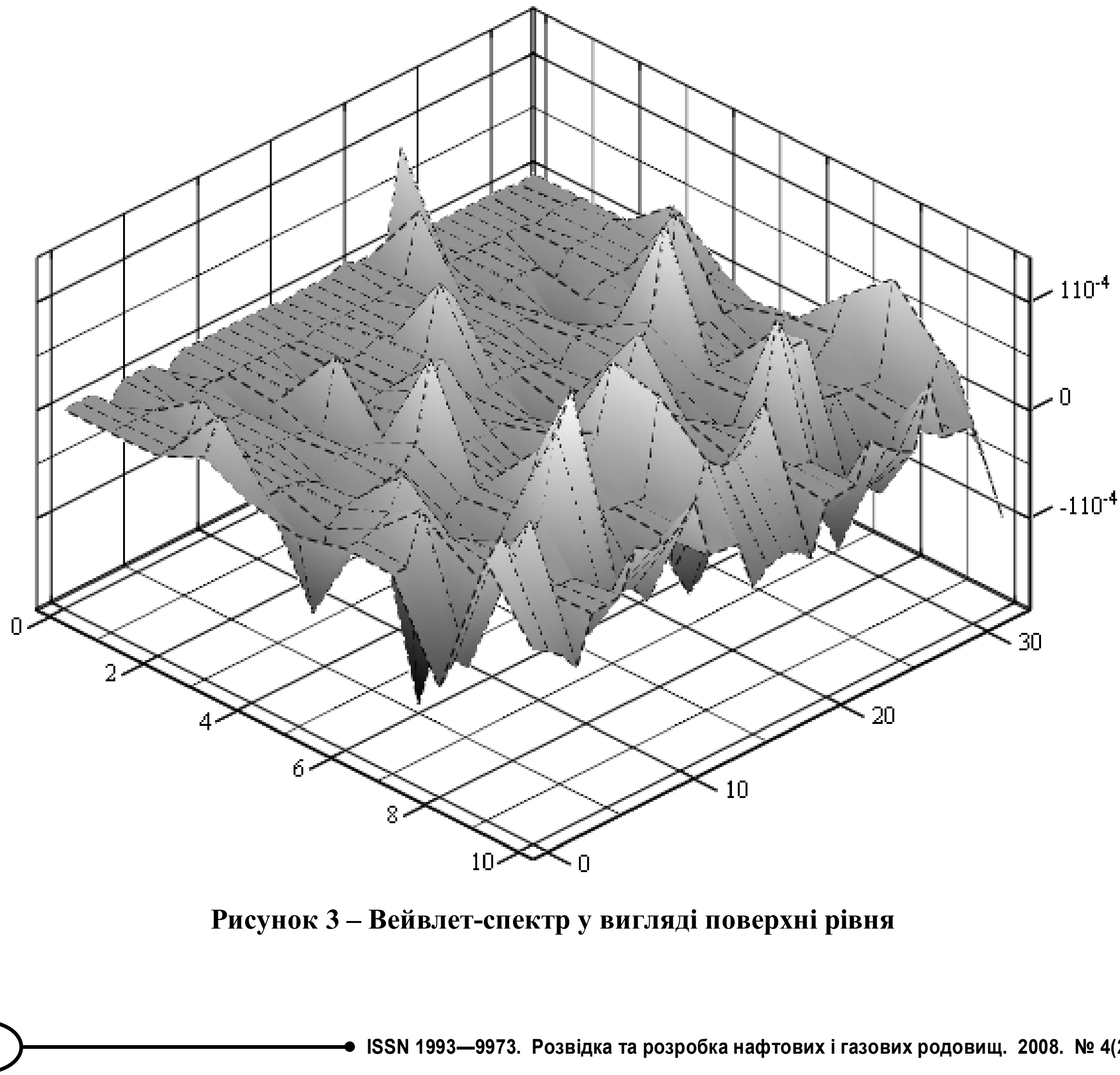

Рисунок 3 – Вейвлет-спектр у вигляді поверхні рівня

ISSN 1993—9973. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2008. № 4(29)

Розрахунки та побудова вейвлет-спектрів із використанням комп'ютерної техніки на даний час є доволі простою процедурою, проте вимагають значного апаратного ресурсу обчислювальних машин, оскільки кожний інтеграл вейвлет-перетворень обчислюється незалежно, без використання методів прискорення, які застосовуються в алгоритмі швидкого перетворення Фур'є. Проте прості прийоми програмування на сучасних високопродуктивних комп'ютерах широко та доступно розкривають математичний зміст вейвлет-перетворень.

З метою більш детального пояснення розглянутої методики наведемо приклад застосування вейвлет-перетворення. На рисунку 1 зображено діаграму вертикальної віброшвидкості ведучої труби бурильної колони. Як видно з викладених теоретичних положень вейвлет-спектр має не один аргумент а два. Крім першого аргументу – частоти, другим аргументом є місце локалізації вейвлетоутворюючої функції. Аналіз досліджуваного сигналу було розпочато з розрахунку коефіцієнтів вейвлет-спектрів Добеші, серед усього можливого сімейства яких на рисунку 2 зображено три основних; два з яких несуть інформацію про високо- і низькочастотну складові, а третій характеризує середньочастотний процес.

Більш якісну картину дає вейвлет-спектр у вигляді поверхні рівня (рис. 3), де вже є очевидним нестаціонарний випадковий характер вібрації. Вздовж горизонтальних осей x і y відкладено значення часу і частоти вейвлет-перетворень, а вздовж вертикальної осі z – значення амплітуди. Високочастотні складові спектру зображено на рисунку великомасштабними екстремальними ділянками світлого кольору, низькочастотні – темного кольору. Характерне чергування областей з різним знаком майже по всій поверхні рівня спектра підтверджує хвильову природу збурення.

На основі проведеного аналізу можна сказати, що можливість застосування вейвлет-перетворень для аналізу власних резонансних коливань машин та механізмів є ефективною. Саме такий підхід дасть можливість оцінити поточний технічний стан тих чи інших елементів конструкції та виявити дефекти.

Література

1 Вильнер Л.Д. Виброскорость как критерий вибрационной напряженности упругих систем // Проблемы прочности. – 1970. – № 9. – С. 42-45.

2 Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

3 Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: Пер. с фран. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 312 с.

4 Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В.П.Максимов, И.В.Егоров, В.А.Карасёв. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.