УДК 681.518.3

В.В. КУХАРЧУК, С.Ш. КАЦИВ

ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ

Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
E-mail: kaciv@energo.vstu.vinnica.ua

Анотація. В роботі розглянута частотно-часова технологія вібродіагностування машин. Пропонується використання для неї математичного апарату вейвлет-перетворень та аналізуються його переваги. Наводиться приклад дискретного вейвлет-перетворення довільного нестаціонарного сигналу та один з можливих алгоритмів його застосування.

Аннотация. В роботе рассмотрена частотно-временная технология вибродиагностирования машин. Предлагается использование для нее математического аппарата вейвлет-преобразований и анализируются его преимущества. Приводится пример дискретного вейвлет-преобразования произвольного нестационарного сигнала и один с возможных алгоритмов его применения.

Abstract. In the work the frequency-temporary technology diagnostics of vibration of machines is considered. Use for it of the mathematical device of wavelet-transformations is offered and its advantages are analyzed. The example of discrete wavelet-transformations of an any non-stationary signal and one from possible algorithms of its application is resulted.

Ключові слова: вібродіагностування, нестаціонарний сигнал, амплітудно-частотний спектр, вейвлет-перетворення, материнський вейвлет.

ВСТУП

В цій роботі розглядаються деякі аспекти *частотної* технології вібродіагностування машин, яка базується на аналізі амплітудно-частотного спектру (АЧС) вібросигналів.

У значній кількості існуючих методів вібродіагностування допускають, що контрольований сигнал вібрації обертової машини є *стаціонарним*, тобто його АЧС не змінюється в часі [1].

Разом з тим, якщо сигнал вимірюється протягом довгого часу (тобто має місце його моніторинг), то за цей час в результаті зношення окремих деталей (або з інших причин) в конструкції машини можуть відбуватися локальні деформації, що в свою чергу приводять до змін АЧС вібросигналу. Крім того, у вібросигналі завжди присутня випадкова складова, за рахунок існування короткочасних динамічних явищ, випадкових похибок вимірювального каналу, впливу зовнішнього середовища тощо Тому, доцільно вважати, що в найбільш загальному випадку контрольований сигнал вібрації машини є *нестаціонарним*, тобто його АЧС змінюється в часі.

Це означає, що в цьому випадку методика отримання спектрограм за допомогою перетворення Фур'є є некоректною і слід застосувати перетворення, яке б забезпечувало неперервне визначення АЧС сигналу в часі, тобто *частотно-часове перетворення*.

АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВІБРОСИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІКОННОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ТА ПРИНЦИП НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Найбільш розробленою частотно-часовою технологією аналізу нестаціонарних вібросигналів є частотно-часовий аналіз (ЧЧА), який базується на *віконному перетворенні Фур'є* (ВПФ), яке іноді ще називають *зваженим або короткочасним* перетворенням Фур'є [2-4].

Вібросигнал $f(t)$ аналізується лише в межах деякого вікна, для чого $f(t)$ множиться на функцію з компактним носієм $h(t)$, яка "локалізує " сигнал в зоні моменту часу t_0

$$f_{t_0}(t) = f(t)h(t-t_0). \tag{1}$$

© В.В. КУХАРЧУК, С.Ш. КАЦИВ, 2009

ВПФ локалізованого сигналу визначається за виразом:

$$f_{t_0}(\omega,h)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(t-t_0)e^{-i\omega t}dt\ . \tag{2}$$

Для обчислення ВПФ в інші моменти часу вікно пересувається, щоб локалізувати сигнал в іншому проміжку часу.

Методи ЧЧА, які побудовані на ВПФ, дають прийнятні результати в задачах вібродіагностування, якщо ми маємо справу з вібросигналами, спектри яких містяться у відносно вузькій смузі частот. Але, якщо АЧС вібросигналу є широким, то в цьому випадку на перший план виходить проблема *розрізнювальної здатності* частотно-часового перетворення.

Справа в тому, що на будь-які частотно-часові перетворення розповсюджується дія загальновідомого *принципу невизначеності Гейзенберга*, що в нашому випадку формулюється так: *ні для якого фіксованого моменту часу неможливо точно визначити, які спектральні компоненти містяться в сигналі*.

З цього принципу випливає, що ми можемо визначати лише *часові інтервали*, на протязі яких сигнал містить *смуги частот*.

Тобто, якщо розмір вікна (тобто часовий інтервал) буде малим, що означає високу часову локалізацію спектру, то смуга частот буде дуже розмитою, і навпаки, більш точне визначення спектральних компонентів потребує великого вікна.

Оскільки ВПФ має фіксовану ширину вікна, то очевидно, що при широкому АЧС в якійсь його частині буде мати місце низька розрізнювальна здатність перетворення.

Реальні нестаціонарні вібросигнали частіш за все складаються з короткочасних високочастотних компонентів і довготривалих низькочастотних, тому для їх аналізу доцільно було б застосовувати перетворення, яке б забезпечувало різні вікна для різних частот (вузькі – на високих частотах та широкі – на низьких). Цим умовам відповідає *вейвлет-перетворення*.

НЕПЕРЕРВНЕ ТА ДИСКРЕТНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Вейвлет-перетворення забезпечує оптимальну розрізнювальна здатність перетворення для всіх частот, тому вейвлет-вікна іноді називають *вікнами Гейзенберга*.

Віконну функцію зазвичай називають *материнським вейвлетом.* Материнськими вейвлетами можуть бути різні функції, як-то вейвлети Хаара, Шеннона, Добеші, Мейера, "мексиканський капелюх" тощо [5-7].

Якщо позначити материнський вейвлет як $\psi(t)$, то вейвлет-перетворення сигналу $f(t)$ з масштабним параметром s та часовим зсувом τ визначається як

$$Wf(\tau,s)=\frac{1}{\sqrt{s}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right)dt\ , \tag{3}$$

де ψ^* – спряжений материнський вейвлет.

Якщо сигнал $f(t)$ заданий в аналітичному вигляді, то формула (3) відображає *неперервне* вейвлет-перетворення (НВП) сигналу $f(t)$ [5-7].

Очевидно, що областю визначення функції $Wf(\tau,s)$ є множина всіх можливих комбінацій s та τ.

Масштабний параметр s є по суті величиною, оберненою частоті. Оскільки він міститься в знаменнику, то $s>1$ розтягує сигнал, а $s<1$ стискає його.

Алгоритм обчислення НВП досить простий. Спочатку дослідник обирає материнський вейвлет, а далі для всіх точок області визначення обчислюється $Wf(\tau,s)$.

Таким чином отримується матриця значень вейвлет-коефіцієнтів для всіх комбінацій s, τ.

На жаль, реальні вібросигнали неможливо представити в аналітичному вигляді. Вони надходять від сенсорів у вигляді числових послідовностей через певні проміжки часу і за своєю природою є *дискретними*. В таких випадках застосовують *дискретне вейвлет-перетворення* (ДВП) за допомогою так званих *пірамідальних* алгоритмів [5-8].

В загальному вигляді ітераційні формули ДВП мають вигляд

$$s_{j+1,k}=\sum_m h_m s_{j,2k+m}\ , \tag{4}$$

$$d_{j+1,k} = \sum_m g_m s_{j,2k+m}\,, \tag{5}$$

де $d_{j+1,k}$ – елементи матриці вейвлет-коефіцієнтів; h_m, g_m – параметри материнського вейвлету; $s_{j+1,k}$ – елементи матриці проміжних обчислень; $s_{0,k} = f(k)$.

Відмітимо, що параметри h_m, g_m материнського вейвлету можуть бути визначені самостійно, якщо це оригінальний вейвлет, або знайдені в математичній літературі, наприклад, в [6], якщо це один з відомих вейвлетів.

Розглянемо приклад. Нехай задано дискретний вібросигнал (рис. 1). За допомогою ДВП визначимо його матрицю вейвлет-коефіцієнтів.

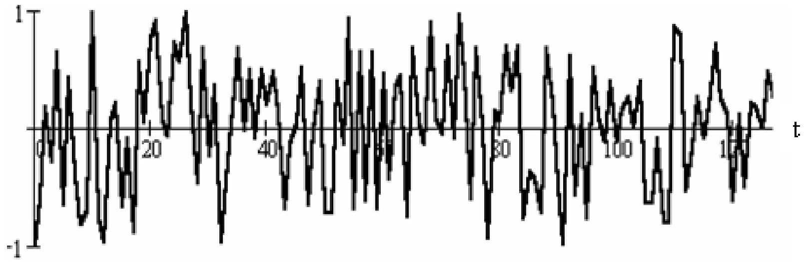

Рис. 1. Дискретний вібросигнал

Розрахунки проведемо в середовищі MathCAD за допомогою вбудованої функції "***Wave***", яка реалізує один з чисельних алгоритмів ДВП на основі материнського вейвлету Добеші.

$$W := \mathrm{wave}(F) \qquad k := 1..6$$

$$\mathrm{coeffs}(\mathrm{level}) := \mathrm{submatrix}\left(W, 2^{\mathrm{level}}, 2^{\mathrm{level}+1} - 1, 0, 0\right),$$

$$C_{i,k} := \mathrm{coeffs}(k)_{\mathrm{floor}\left[\frac{i}{\left(\frac{128}{2^k}\right)}\right]}.$$

Графік матриці вейвлет-коефіцієнтів C показаний на рис. 2.

Рис. 2. Графік матриці вейвлет-коефіцієнтів

Відмітимо, що вісь "**i**" графіка відповідає часу, а вісь "**k**" – частоті.

З рис. 2 видно, що внаслідок дії принципу невизначеності Гейзенберга ми не можемо знайти точні спектральні характеристики сигналу в кожен момент часу. Разом з тим, нам відомі смуги частот в певних інтервалах часу.

Отриману в результаті ДВП матрицю вейвлет-коефіцієнтів можна використовувати як для вібродіагностування машини, так і для оцінки випадкових похибок вимірювального каналу.

Один з можливих алгоритмів аналізу вібросигналу на основі ДВП в режимі реального часу зображений на рис. 3.

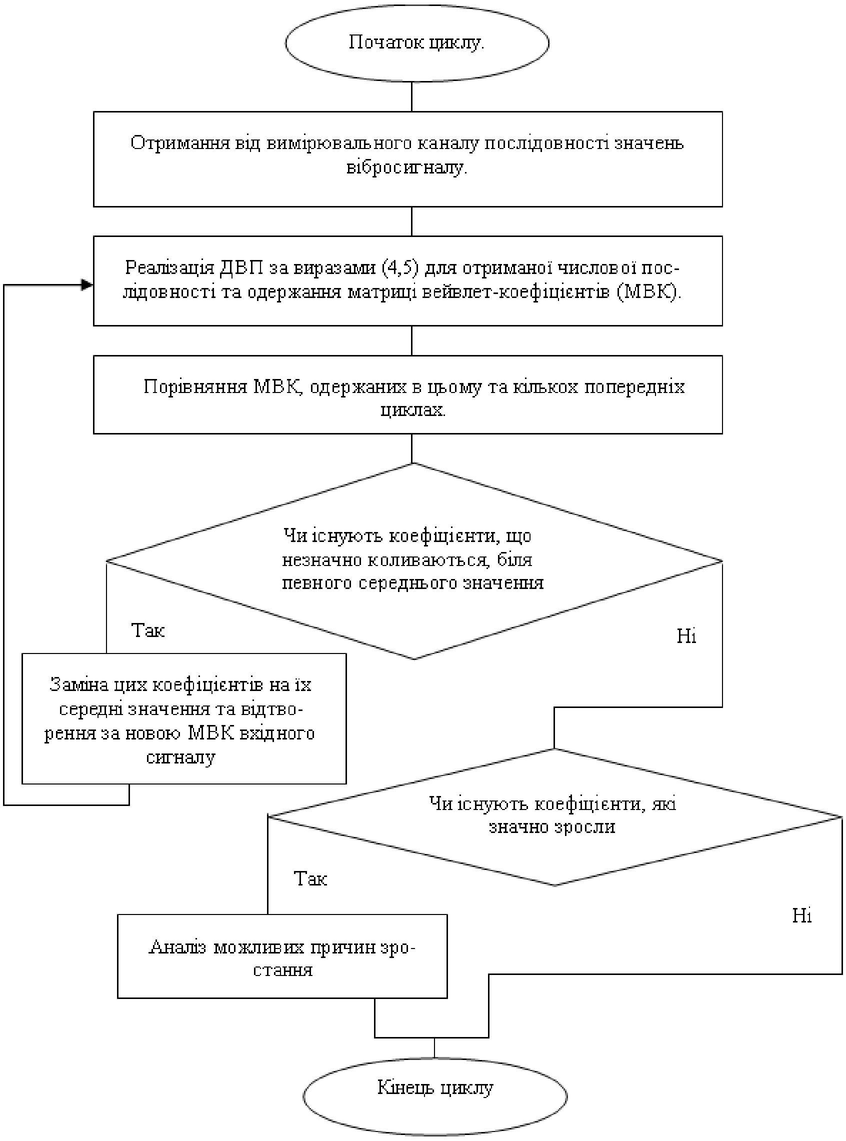

Рис. 3. Алгоритм аналізу вібросигналу на основі ДВП в режимі реального часу

ВИСНОВКИ

1. Александров А.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / Александров А.А., Барков А.В., Баркова Н.А., Шафранский В.А. – Изд. “Судостроение”, Ленинград, 1986.
2. Коэн Л. Время-частотные распределения. Обзор / Коэн Л // ТИИЭР. – 1989. – Т.77.№10. – С. 72-120.
3. Алексеев А.А. Частотно-временной анализ сигналов связи и радиотехнического обеспечения. / Алексеев А.А. – Л.: ВАС, 1987. – 212 с.
4. Воронцов О.Г. Інформаційно-вимірювальні системи високочастотної вібродіагностики роторних машин. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. / Воронцов О.Г. – Донецьк-2003. – 400 с.
5. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / Малла С.; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил. – ISBN 5-03-003691-1
6. К. Блаттер. Вэйвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер. – Москва, 2004. – 280 с. – ISBN 5-94836-033-4
7. Чуи Ч. Введение в вэйвлеты / Чуи Ч.; пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с., ил. – ISBN 5-03-003397-1

8. И.М. Дремин. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи Физических Наук. – 2001. – Том 171, №5. – С. 465-501.

Надійшла до редакції 20.11.2008р.

КУХАРЧУК В.В. – д.т.н., проф., завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

КАЦИВ С.Ш. – к.т.н., доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.