УДК 681.518.3

В. В. Кухарчук, д-р. техн. наук, проф.; С. Ш. Кацив, канд. техн. наук, доц.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІБРОСИГНАЛІВ З РІЗНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ СТИСКАННЯ

Розроблено математичну модель та алгоритм дискретного вейвлет-перетворення з довільними цілими коефіцієнтами стискання і проведено оцінку ефективності алгоритму з точки зору швидкодії та роздільної здатності.

Вступ

Віброакустичний сигнал гідроагрегата є нестаціонарним процесом, тобто його амплітудно-частотний спектр змінюється в часі, тому, для отримання тривимірного амплітудно-частотно-часового спектра (АЧЧС) такого сигналу часто використовують віконне перетворення Фур'є. Але, внаслідок фіксованого розміру вікна, згідно з принципом невизначеності Гейзенберга неможливо забезпечити високу роздільну здатність перетворення, тому для аналізу вібросигналу в широкому діапазоні частот застосовують перетворення зі змінною шириною вікна — *вейвлет-перетворення*. Оскільки інформація про реальний вібросигнал завжди надходить в дискретному вигляді, то для його перетворення використовують дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) [1].

Математична модель і алгоритм ДВП з довільними цілими коефіцієнтами стискання

Одним з найважливіших параметрів в процедурі дискретного вейвлет-перетворення є коефіцієнт стискання k, оскільки він задає структуру матриці вейвлет коефіцієнтів (МВК). Довжина кожного наступного рядка цієї матриці, як правило, зменшується в геометричній прогресії і коефіцієнт стискання є показником цієї прогресії.

Кількість коефіцієнтів у рядку дорівнює кількості часових інтервалів, на які розбито стек вхідного сигналу, тобто у кожного наступного рядка МВК тривалість часового інтервала в k раз більша, ніж у попереднього. При цьому, відповідно до принципу невизначеності Гейзенберга, ширина кожного наступного рядка МВК (ширина смуги частот) в k раз менша, ніж у попереднього. Таким чином, смуги низьких частот є досить вузькими, що забезпечує кращу деталізацію спектра.

Найчастіше в алгоритмах ДВП застосовують $k=2$, при якому довжина кожного з рядків МВК удвічі менша за довжину попереднього. Разом з тим, при дослідженні складних нестаціонарних сигналів доцільно розглядати варіанти алгоритмів ДВП з іншими коефіцієнтами стискання.

Вибір величини коефіцієнту стискання є досить непростою проблемою. Справа в тому, що із збільшенням k при однаковій довжині вектору вхідного сигналу кількість рядків МВК зменшується, що призводить до зростання ширини кожної смуги частот і до погіршення роздільної здатності перетворення. Одночасно з цим зростає швидкодія ДВП, що може виявитись суттєвою перевагою при необхідності забезпечити швидке діагностування сигналу. Очевидно, що у випадку необхідності забезпечення більш детального діагностування, слід вибирати менші значення k і погодитися із зниженням швидкодії алгоритму. Отже, оптимальним слід вважати таке значення коефіцієнту стискання, при якому буде забезпечуватися діагностування в режимі квазіреального часу без суттєвої втрати діагностичних ознак.

Основою ДВП є кратномасштабний аналіз, який ґрунтується на ортонормальному базисі, що складається з масштабної функції $\phi(x)$ та материнського вейвлета $\psi(x)$ [1, 2].

Для довільного k масштабна функція і материнський вейвлет задовольняють умовам

$$\phi(x)=\sqrt{k}\sum_{i=0}^{N-1}h(i)\phi(kx-i),\ \ \psi(x)=\sqrt{k}\sum_{i=0}^{N-1}g(i)\phi(kx-i), \tag{1}$$

де $h(N)$, $g(N)$ — вектори коефіцієнтів, які однозначно характеризують $\phi(x)$ та $\psi(x)$ і використовуються в алгоритмі ДВП.

Між векторами $h(N)$, $g(N)$ існує співвідношення

$$\forall i=0,N-1\Big(g(i)=(-1)^i h(N-1-i)\Big). \tag{2}$$

Для довільного k масштабовані та зміщені масштабна функція і материнський вейвлет записуються як

$$\phi_{j,i}(x)=k^{\frac{j}{2}}\phi\left(k^j x-i\right),\ \psi_{j,i}(x)=k^{\frac{j}{2}}\psi\left(k^j x-i\right), \tag{3}$$

і утворюють ортонормальний базис.

Вибір масштабувального множника k^j з цілими значеннями j приводить до однозначної та самоузгодженої процедури розрахунку вейвлет-коефіцієнтів.

Алгоритм ДВП з довільним k можна побудувати аналогічно [2].

Спочатку формується перший рядок проміжної матриці $\left[a_{j,n}\right]$:

$$a(0,n)=f(n). \tag{4}$$

В подальших кроках алгоритму почергово формуються наступні рядки проміжної матриці $\left[a_{j,n}\right]$ та матриці вейвлет-коефіцієнтів $\left[d_{j,n}\right]$:

$$a(j,n)=\sum_{i=0}^{N-1}h(i)a(j-1,kn+i),\ \ d(j,n)=\sum_{i=0}^{N-1}g(i)a(j-1,kn+i). \tag{5}$$

Враховуючи те, що в останньому рядку має залишитися один елемент, довжина вхідного вектора сигналу має дорівнювати k^M, де M — натуральне число. В цьому випадку результатом виконання ДВП буде матриця вейвлет коефіцієнтів розміром $k^{M-1}\cdot M$.

Під час побудови алгоритму були враховані особливості вимірювальних каналів системи автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів (САДП-РДГ) [3], а саме:

1. Числові дані надходять з каналу в систему для подальшої обробки окремими стеками розміром по 32768 значень. При цьому, кожний стек відповідає окремому часовому інтервалу і для коректного аналізу даних одного стека неприпустимо використовувати дані іншого. Тому, максимальна довжина вектора даних, яка може задаватись в програмі не має перевищувати 32768, тобто $k^M < 32768$.

2. До кожного показання вібросенсора апаратні засоби вимірювального каналу додають деяку сталу величину, яку під час обробки сигналу необхідно усунути.

За цим алгоритмом розроблено програму для попереднього дослідження віброакустичних сигналів, які були отримані від вібросенсорів гідроагрегату.

Амплідудно-частотно-часові спектри вібросигналів гідроагрегату з різними коефіцієнтами стискання

За допомогою вищезгаданої програми були побудовані АЧЧС гідроагрегату, які зображені на рис. 1—4.

Ці спектри є тривимірними, при цьому, по вертикалі відкладаються значення вейвлет-коефіцієнтів, по горизонталі — час, а в глибині спектру розташовані рядки, що відповідають смугам частот.

Розташування смуг здійснено таким чином, що смуги низьких частот містяться в глибині графіка і зі збільшенням частоти наближаються до оператора.

Ширина кожної смуги частот, у відповідності до принципу Гейзенберга, зменшується зі збільшенням довжини інтервалу часу, тому смуги низьких частот є досить вузькими, що забезпечує високу роздільну здатність ДВП. Для кращої наочності ширина кожної смуги частот зображені в логарифмічному масштабі.

Спробуємо оцінити ефективність алгоритмів ДВП з різними коефіцієнтами стискання і визначити оптимальний k з точки зору швидкодії та роздільної здатності.

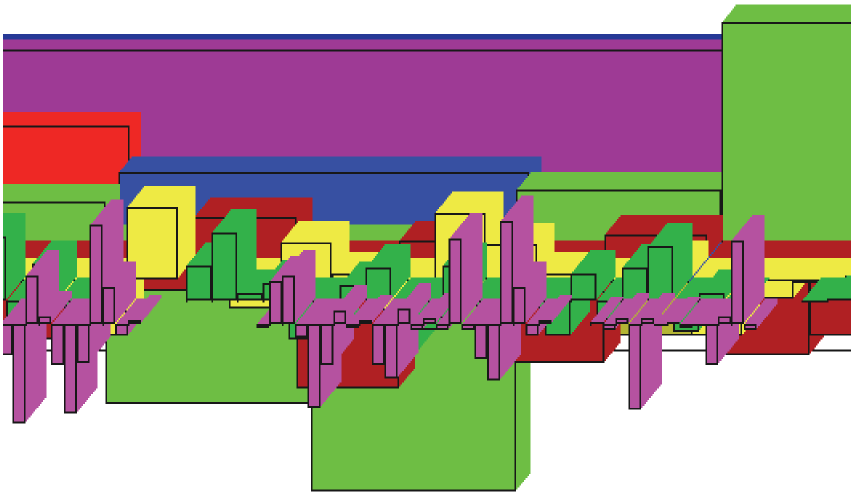

Рис. 1. АЧЧС вібросигналу з коефіцієнтом стискання 2

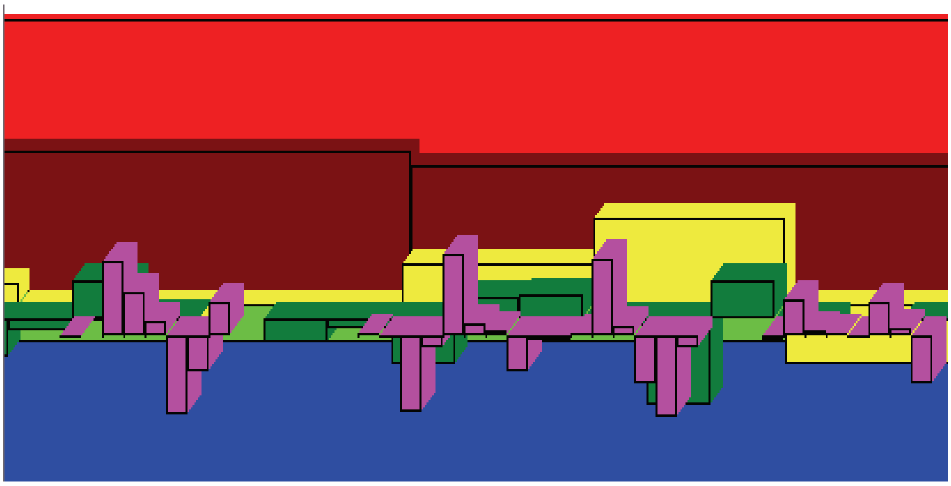

Рис. 2. АЧЧС вібросигналу з коефіцієнтом стискання 3

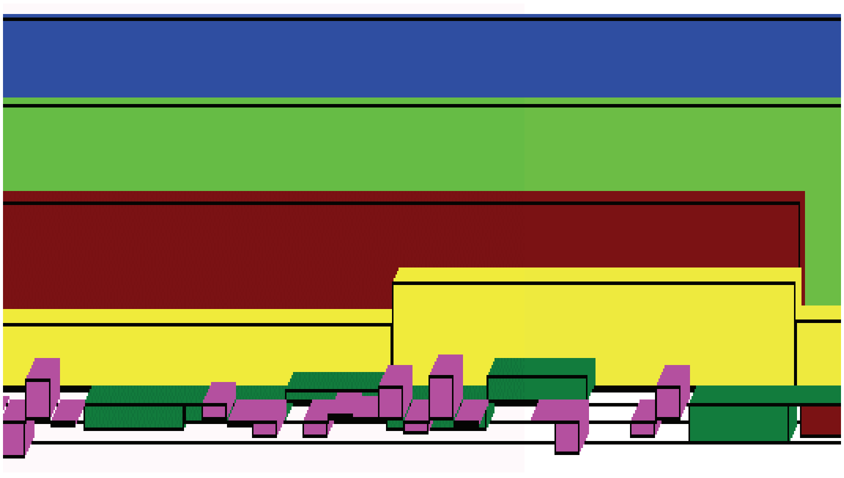

Рис. 3. АЧЧС вібросигналу з коефіцієнтом стискання 4

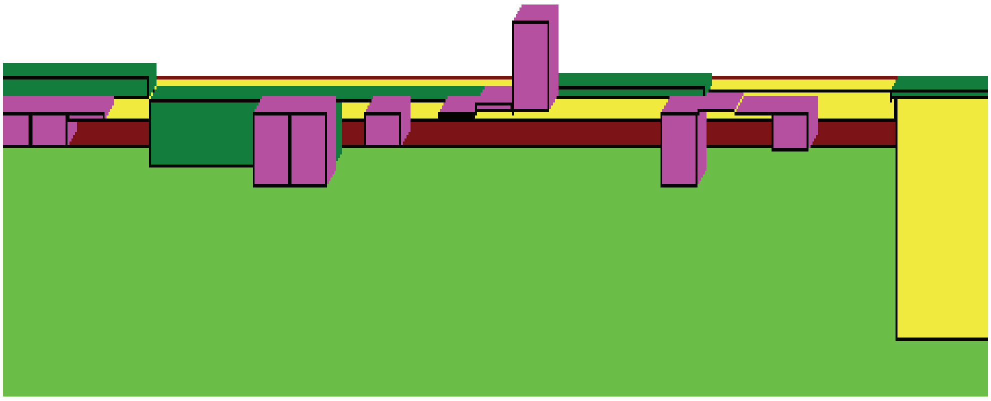

Рис. 4. АЧЧС вібросигналу з коефіцієнтом стискання 5

Легко визначити, що зі зростанням коефіцієнта стискання зменшується кількість смуг частот — для $k=2$ їх 14, для $k=3$ — 9, для $k=4$ — 7, для $k=5$ — 6. При цьому, швидкодія алгоритму ДВП приблизно обернено-пропорційна кількості смуг частот, тобто, наприклад, для $k=3$ програма працює майже в півтора рази швидше, ніж коли $k=2$, а для $k=4$ — майже удвічі швидше. Одночасно роздільна здатність буде погіршуватися.

З вищенаведених спектрів видно, що зі зростанням ширини смуг частот погіршується деталізація вейвлет-коефіцієнтів. Разом з тим, АЧЧС з $k=3$ може бути використана для діагностування, але більш впевнено можна буде зробити цей висновок, лише після того, як буде сформована штучна нейронна мережа, проведене її навчання і виконані додаткові дослідження, щоб встановити, як впливає збільшення ширина смуг частот (погіршення роздільна здатність ДВП) на на якість діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів.

Висновки

1. Зі зростанням коефіцієнта стискання швидкодія алгоритму дискретного вейвлет-перетворення збільшується майже прямо пропорційно, що дає можливість оперативнішого діагностування дефектів гідроагрегатів.

2. Суттєвим недоліком збільшення коефіцієнта стискання є зростання ширини смуг частот і, як наслідок, погіршення роздільної здатності ДВП.

3. Попередній аналіз результатів ДВП дає можливість припустити, що оптимальне значення коефіцієнта стискання дорівнює 3, але існує необхідність провести додаткові дослідження цього питання після формування і навчання штучної нейронної мережі системи автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Добеши И. — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.

2. Кухарчук В. В. Аналіз вібросигналів гідроагрегату за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стискання 2 / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацив, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. — 2011. — № 1. — С. 124—129.

3. Кухарчук В. В. Система автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацив, І. К. Говор, В. Я. Ніколаєв, В. Л. Маліцький // Вісник Інженерної Академії України. — 2009. — № 2. — С. 126—131.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань

Стаття надійшла до редакції 24.01.12
Рекомендована до друку 17.02.12

Кухарчук Василь Васильович — завідувач кафедри, ***Кацив Самоїл Шулімович*** — доцент.

Кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, Вінниця