

УДК 681.518.3

В.В. Кухарчук, д.т.н.
С.Ш. Каців, к.т.н.
С.О. Биковський**ЧАСТОТНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАСШТАБНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДИСКРЕТНОГО
ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІБРОСИГНАЛІВ**

Вінницький національний технічний університет, e-mail: kaciv@nneem.vntu.edu.ua

В роботі розглянуті питання частотної ідентифікації масштабних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення тобто визначені смуги частот, які відповідають цим масштабним коефіцієнтам. Показано, що ширина смуг частот залежить від коефіцієнта стискання дискретного вейвлет-перетворення, від розміру стеку вхідного сигналу та частоти його дискретизації.

Ключові слова: дискретне вейвлет-перетворення, матриця вейвлет коефіцієнтів, масштабний коефіцієнт, коефіцієнт стискання, смуга частот.

Вступ

Одним з найбільш поширених методів діагностування дефектів гідроагрегата є аналіз спектрального складу його віброакустичного сигналу, оскільки значна кількість дефектів різних вузлів гідроагрегата (наприклад, неврівноваженість ротора та порушення совісності валів, дефекти підшипників ковзання та кочення, дефекти зубчатих передач і порушення гідродинаміки потоку) характеризуються різними спектральними складовими [1].

У випадку використання для отримання тривимірною амплітудно-частотно-часового спектру вібросигналу віконного перетворення Фур'є смуги частот визначаються досить просто і є однаковими, що не дає можливості забезпечити високу роздільну здатність перетворення.

Тому для аналізу вібросигналу в широкому діапазоні частот застосовують перетворення зі змінною шириною вікна, тобто *вейвлет-перетворення*, а оскільки інформація про реальний вібросигнал завжди надходить в дискретному вигляді, то – *дискретне вейвлет-перетворення* (ДВП) [2, 3].

Результатом ДВП є матриця вейвлет-коефіцієнтів (МВК), графік якої будується не в координатах “час – частота”, а в координатах “час – масштабний коефіцієнт”. Тому, для забезпечення можливості діагностування дефектів гідроагрегата, насамперед слід визначити – яка смуга частот відповідає кожному з масштабних коефіцієнтів (тобто кожному рядку МВК).

Математична модель і алгоритм частотної ідентифікації масштабних коефіцієнтів

Нагадаємо, що МВК є трикутною матрицею у якої довжина кожного наступного рядку цієї матриці, як правило, зменшується в геометричній прогресії і показником цієї прогресії є коефіцієнт стискання k [4].

Масштабним коефіцієнтом певного рядку МВК природно вважати кількість вейвлет-коефіцієнтів в ньому.

Очевидно, що при цілому коефіцієнті стискання k і M рядках, масштабний коефіцієнт останнього рядку МВК дорівнює 1, передостаннього – k , першого k^{M-1} . Довжина стеку вхідного сигналу при цьому (виходячи з алгоритму ДВП) дорівнює k^M .

Оскільки МВК задає частотно-часовий спектр віброакустичного сигналу, то по суті масштабний коефіцієнт рядка дорівнює кількості часових інтервалів, на які розбито вхідний сигнал.

Звідси у кожного наступного рядка МВК тривалість часового інтервала в k раз більша, ніж у попереднього, а, відповідно до принципа невизначеності Гейзенберга, ширина кожного наступного рядка МВК (ширина смуги частот) в k раз менша, ніж у попереднього.

Позначимо масштабний коефіцієнт i -го рядка, як m_i (приймемо для зручності нумерацію рядків, починаючи з останнього).

Тоді

$$m_i = k^{i-1}, \quad (1)$$

а ширина смуги частот i -го рядка повинна бути прямопропорційною m_i .

Визначимо тепер частотний діапазон ΔF отриманого в результаті ДВП частотно-часового спектру віброакустичного сигналу.

Нехай частота дискретизації вібросигналу (яка є одним з параметрів вимірювального каналу вібрації) дорівнює F_δ . Тоді, згідно з теоремою Котельнікова-Шеннона

$$\Delta F = \frac{F_\delta}{2}. \quad (2)$$

Очевидно, що частотний діапазон ΔF відповідає сумі всіх масштабних коефіцієнтів m_i , тобто є сумою елементів геометричної прогресії S_m .

Таким чином, можна записати

$$S_m = \sum_{i=1}^M m_i = \frac{k^M - 1}{k - 1}. \quad (3)$$

Звідси випливає, що ширина смуги частот i -го рядка – Δf_i , яка відповідає масштабному коефіцієнту m_i , знаходиться як

$$\Delta f_i = m_i \frac{\Delta F}{S_m} = \frac{F_\delta (k - 1) k^{i-1}}{2(k^M - 1)}. \quad (4)$$

Зрозуміло, що рядок МВК з одним вейвлет коефіцієнтом відповідає найвужчій смузі частот, яка починається з 0.

З виразу (4) видно, що ширина смуг частот залежить від частоти дискретизації, коефіцієнту стискування і довжини стеку вхідного вібросигналу.

Частотна ідентифікація масштабних коефіцієнтів 3-го гідроагрегата Дністровської ГЕС-2 при різних коефіцієнтах стискування

Програмна реалізація алгоритму, наведеному вище, виконана в середовищі MicrosoftExcel наступними вхідними даними:

- 1 Частота дискретизації вимірювальних каналів дорівнює 913.92 Гц.
- 2 Для різних коефіцієнтів стискування прийняті максимально можливі довжини стеків вхідних сигналів, виходячи з умови $k^M < 32768$, а саме:
 - 2.1 Для $k = 5$, $k^M = 15625$, $M = 6$.
 - 2.2 Для $k = 4$, $k^M = 16382$, $M = 7$.
 - 2.3 Для $k = 3$, $k^M = 19683$, $M = 9$.
 - 2.4 Для $k = 2$, $k^M = 16382$, $M = 14$.

Електронні таблиці MicrosoftExcel наведені на рис. 1 – 4.

	А	В	С	Д	Е
13	F_д	Рядок МВК	Ширина смуги	Початок смуги	Кінець смуги
14	913.92	1	0.116989247	0	0.116989247
15	ΔF	2	0.584946237	0.116989247	0.701935484
16	456.96	3	2.924731183	0.701935484	3.626666667
17	k	4	14.62365591	3.626666667	18.25032258
18	5	5	73.11827957	18.25032258	91.36860215
19	M	6	365.5913978	91.36860215	456.96
20	6				

Рис. 1. Смуги частот спектру вібросигналу при коефіцієнті стискування 5

	A	B	C	D	E
1	F_d	Рядок МВК	Ширина смуги	Початок смуги	Кінець смуги
2	913.92	1	0.083676982	0	0.083676982
3	dF	2	0.334707929	0.083676982	0.418384911
4	456.96	3	1.338831716	0.418384911	1.757216627
5	k	4	5.355326863	1.757216627	7.11254349
6	4	5	21.42130745	7.11254349	28.53385094
7	M	6	85.68522981	28.53385094	114.2190808
8	7	7	342.7409192	114.2190808	456.96

Рис. 2. Смуги частот спектру вібросигналу при коефіцієнті стискання 4

	A	B	C	D	E
1	F_d	Рядок МВК	Ширина смуги	Початок смуги	Кінець смуги
2	913.92	1	0.046434305	0	0.046434305
3	dF	2	0.139302916	0.046434305	0.185737222
4	456.96	3	0.417908749	0.185737222	0.603645971
5	k	4	1.253726247	0.603645971	1.857372218
6	3	5	3.761178742	1.857372218	5.61855096
7	M	6	11.28353623	5.61855096	16.90208719
8	9	7	33.85060868	16.90208719	50.75269586
9		8	101.551826	50.75269586	152.3045219
10		9	304.6554781	152.3045219	456.96

Рис. 3. Смуги частот спектру вібросигналу при коефіцієнті стискання 3

	A	B	C	D	E
1	F_d	Рядок МВК	Ширина смуги	Початок смуги	Кінець смуги
2	913.92	1	0.027892327	0	0.027892327
3	dF	2	0.055784655	0.027892327	0.083676982
4	456.96	3	0.11156931	0.083676982	0.195246292
5	k	4	0.223138619	0.195246292	0.418384911
6	2	5	0.446277239	0.418384911	0.86466215
7	M	6	0.892554477	0.86466215	1.757216627
8	14	7	1.785108954	1.757216627	3.542325581
9		8	3.570217909	3.542325581	7.11254349
10		9	7.140435818	7.11254349	14.25297931
11		10	14.28087164	14.25297931	28.53385094
12		11	28.56174327	28.53385094	57.09559421
13		12	57.12348654	57.09559421	114.2190808
14		13	114.2469731	114.2190808	228.4660538
15		14	228.4939462	228.4660538	456.96

Рис. 4. Смуги частот спектру вібросигналу при коефіцієнті стискання 2

Аналіз результатів частотної ідентифікації масштабних коефіцієнтів 3-го гідроагрегата Дністровської ГЕС-2 при різних коефіцієнтах стискування

В існуючій вібродіагностичній практиці прийнято називати вібрацію в діапазоні, який нижче частоти обертання ротора *низькочастотною*, відповідно від частоти обертання ротора до її 20-ї гармоніки – *середньочастотною*, а вище – *високочастотною* [1].

Проаналізуємо отримані результати (рис. 1 – 4) з цієї точки зору.

Відомо, що частота обертання ротора 3-го гідроагрегата Дністровської ГЕС-2 дорівнює 1.785 Гц.

Отже при різних коефіцієнтах стискування амплітудно-частотно-часовий спектр віброакустичного сигналу має такі складові:

1 Для $k = 5$:

1.1 Перша і друга смуги частот містяться в низькочастотному діапазоні.

1.2 Третя смуга частот охоплює кінець низькочастотного і початок середньочастотного діапазона.

1.3 Четверта смуга міститься в середньочастотному діапазоні.

1.4 П'ята смуга охоплює кінець середньочастотного і початок високочастотного діапазона.

1.5 Шоста смуга повністю відноситься до високочастотного діапазона.

2 Для $k = 4$:

2.1 Смуги частот з першої по третю приблизно охоплюють низькочастотний діапазон.

2.2 Четверта та п'ята смуги містяться в середньочастотному діапазоні.

2.3 Шоста смуга охоплює кінець середньочастотного і початок високочастотного діапазона.

2.4 Сьома смуга повністю відноситься до високочастотного діапазона.

3 Для $k = 3$:

3.1 Смуги частот з першої по четверту приблизно охоплюють низькочастотний діапазон.

3.2 П'ята та шоста смуги містяться в середньочастотному діапазоні.

3.3 Сьома смуга охоплює кінець середньочастотного і початок високочастотного діапазона.

3.4 Восьма та дев'ята смуги повністю відноситься до високочастотного діапазона.

4 Для $k = 2$:

4.1 Смуги частот з першої по шосту приблизно охоплюють низькочастотний діапазон.

4.2 Смуги частот з сьомої по десяту містяться в середньочастотному діапазоні.

4.3 Одинадцята смуга охоплює кінець середньочастотного і початок високочастотного діапазона.

4.4 Смуги частот з дванадцятої по чотирнадцяту повністю відноситься до високочастотного діапазона.

Враховуючи, що найнебезпечніші частотні складові вібросигналу відносяться до низькочастотного діапазону, відзначимо, що деталізацію цього діапазону (4 смуги частот) при $k = 3$ можна вважати цілком прийнятною, тобто $k = 3$ можна вважати оптимальним коефіцієнтом стискування.

Разом з тим, лише після дослідної експлуатації системи автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів (САДП-РДГ) [5] можна буде зробити остаточний висновок щодо цього питання.

Для кращої ілюстрації викладених вище питань наведемо графіки амплітудно-частотно-часових спектрів віброакустичного сигналу при різних коефіцієнтах стискування.

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

Для кращої наглядності графіків МВК ширина кожної смуги частот зображені в логарифмічному масштабі.

Графіки зображені на рис. 5.

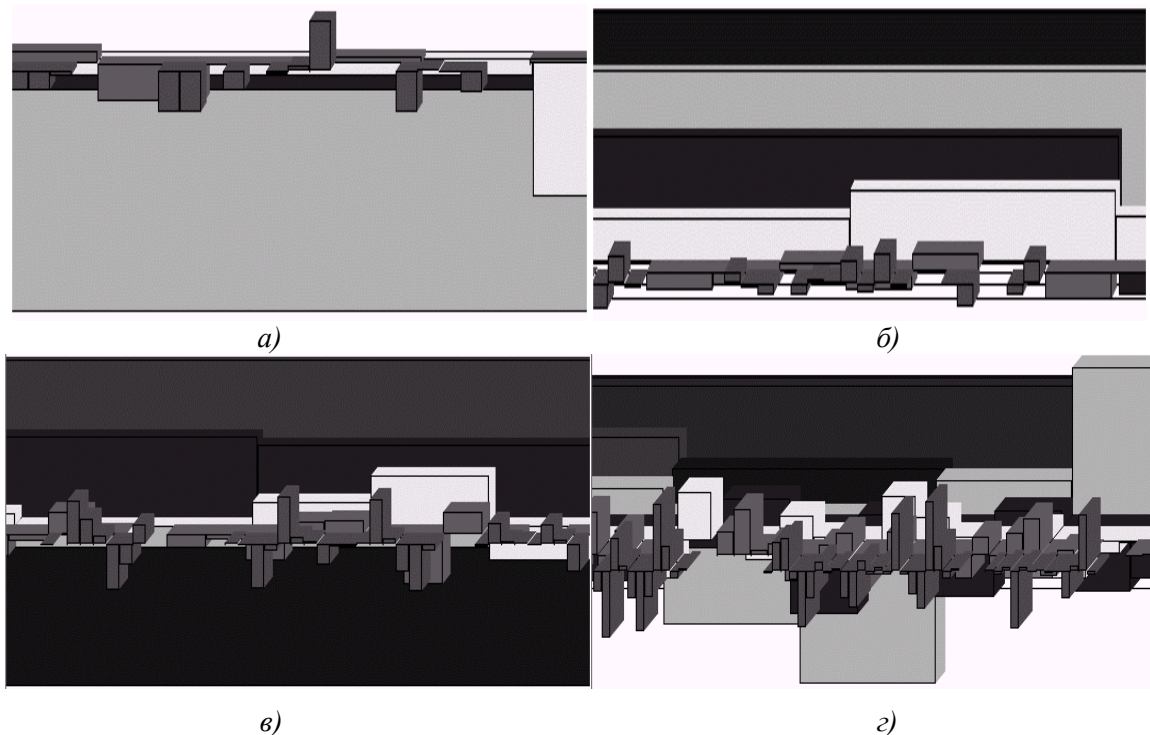


Рис. 5. Амплітудно-частотно-часові спектри вібросигналу при різних коефіцієнтах стиснення ($a - k = 5$, $b - k = 4$, $c - k = 3$, $d - k = 2$)

Висновки

1. Ширина частотних смуг амплітудно-частотно-часового спектру віброакустичного сигналу залежить від коефіцієнта стиснення дискретного вейвлет-перетворення, від розміру стеку вхідного сигналу та від частоти його дискретизації, яка є функцією вимірювального каналу.

2. Розмір стеку вхідного сигналу слід вибирати таким, щоб забезпечити найбільшу кількість частотних смуг для кожного коефіцієнта стиснення.

3. На стадії розробки САДП-РДГ можна прийняти оптимальний коефіцієнт стиснення 3, але з обов'язковим уточненням після дослідної експлуатації системи.

Список літературних джерел

1. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. – Москва, 1996. – 276 с.
2. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / Малла С.; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил. – ISBN 5-03-003691-1
3. К. Блаттер. Вэйвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер. – Москва, 2004. – 280 с. – ISBN 5-94836-033-4
4. Кухарчук В.В. Аналіз вібросигналів гідроагрегату за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стиснення 2 / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2011. – №1. – с. 124-129.
5. Кухарчук В.В. Система автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / Кухарчук В.В., Кацев С.Ш., Говор І.К., Ніколаєв В.Я., Маліцький В.Л. // Вісник Інженерної Академії України. – 2009. – №2. – с. 126-131.