

УДК 681.518.3:621.311.214

В. В. КУХАРЧУК¹, С. Ш. КАЦИВ¹, В. В. УСОВ¹, І. К. ГОВОР¹, С. О. БИКОВСЬКИЙ¹

ВИЗНАЧЕННЯ ФОНОВИХ, ЕЛЕКТРО- ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ СКЛАДОВИХ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНО-ЧАСОВОГО СПЕКТРУ ВІБРОСИГНАЛУ 3-ГО ГІДРОАГРЕГАТУ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГЕС-2

¹Вінницький національний технічний університет
21021, 95, вул. Хмельницьке шосе, м. Вінниця, Україна
E-mail: kaciv@ineem.vntu.edu.ua

Анотація. В роботі запропоновані методи розділення кожної смуги частот амплітудно-частотно-часового спектру вібросигналу на окремі складові, кожна з яких відповідає певним чинникам вібрації. Наведені приклади такого розділення, які базуються на існуючих архівних даних одного з гідроагрегатів.

Ключові слова: амплітудно-частотно-часовий спектр, фонові складова, електродинамічна складова, гідродинамічна складова.

Аннотація. В работе предложены методы разделения каждой полосы частот амплитудно-частотно-временного спектра вибросигнала на отдельные составляющие, каждая из которых соответствует определенным причинам вибрации. Приведены примеры такого разделения, которые основываются на существующих архивных данных одного из гидроагрегатов.

Ключевые слова: амплитудно-частотно-временной спектр, фоновая составляющая, электродинамическая составляющая, гидродинамическая составляющая.

Abstract. In the work the methods of divisions every frequency regions of peak-frequency-hour spectrum of vibrating signal to separate components, each of that is corresponding to certain causes of vibrating, is offered. Examples that divisions, that based on existent archive date one of hydrounits are considered.

Keyword: peak-frequency-hour spectrum, background component, electrodynamic component, hydrodynamic component.

ВСТУП

Загальновідомо, що впровадження засобів діагностування є одним із найважливіших чинників підвищення економічної ефективності використання устаткування в промисловості. Призначення діагностування — виявлення і попередження відмов та несправностей, підтримка експлуатаційних показників у встановлених межах, прогнозування стану обладнання з метою повного використання ресурсу. Одним з найпоширеніших видів діагностування є вібродіагностування, оскільки практично миттєва реакція вібросигналу на зміну стану обладнання є незамінною якістю в аварійних ситуаціях, коли визначальним чинником є швидкість постановки діагнозу і прийняття рішення, що черговий раз довела аварію на Саяно-Шушенський ГЕС.

Основним фізичним носієм інформації про стан елементів працюючого устаткування у вібродіагностуванні є віброакустичний сигнал — збірне поняття, що містить інформацію про коливальні процеси (вібраційні, гідро- або газодинамічні тощо) і акустичний шум механізму в навколишньому середовищі. Отже вібродіагностуванню може піддаватися будь-яке устаткування, функціонування якого супроводжується коливальними процесами [1].

Протягом останніх років у світі ведеться активна робота по створенню автоматизованих комп'ютерних систем моніторингу та діагностування дефектів машин та обладнання. Одними з перших були системи, розроблені в АО ВАСТ (м. С.-Петербург), які базувалися на спектральному аналізі вібросигналів, та забезпечували вібродіагностування роторних машин. В останні роки створені спеціалізовані комп'ютерні системи для діагностування гідроагрегатів, виробництва ТОВ «Ампер» (комплекс КНК-32) та ДІАМЕХ2000 (комплекс АЛМАЗ-7010-ГЕС), які теж базуються на спектральному аналізі.

Недоліком вищезгаданих систем діагностування є те, що спектр сигналу отримується за допомогою звичайного перетворення Фур'є, яке дає адекватний результат лише для стаціонарних сигналів, в той час як вібросигнал гідроагрегату є суттєво нестационарним. Тому останнім часом проводяться дослідження, які виправляють цей недолік, але при цьому нестационарний вібросигнал трансформується в тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр (АЧЧС) з допомогою віконного перетворення Фур'є, що має фіксовану ширину вікна і, внаслідок цього, недостатню роздільну здатність.

Авторами було запропоновано спектральний аналіз вібросигналів здійснювати за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (ДВП), яке має змінну ширину вікна і тому значно кращу роздільну здатність [2—5].

Разом з тим, навіть за наявності АЧЧС вібросигналу діагностування існуючих дефектів гідроагрегатів є досить складною задачею. Справа в тому, що гідроагрегат є дуже складною динамічною гідроелектромеханічною системою і математичний опис залежності віброакустичного сигналу від всіх чинників, які викликають вібрацію, практично неможливий. Особливо це стосується гідромеханічної складової вібросигналу, яка викликається турбулентністю, кавітацією, виникненням стоячих хвиль тощо. Тому доцільно розглядати гідроагрегат як «чорну скриньку», тобто моделювати не його структуру, а зовнішнє функціонування.

Для розв'язання задачі вібродіагностування передбачається створення системи автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідрогенераторів (САДП-РДГ) [5]. В цій системі основні масиви вхідних даних формуються за допомогою ДВП вібросигналів, які надходять від вібросенсорів ВД1 — ВД4, що встановлені по радіальним вертикальному і горизонтальному напрямкам турбінного і опорно-упорного підшипників гідроагрегату. Додатково до віброакустичних сигналів САДП-РДГ отримує дані про струм навантаження та частоту обертів гідроагрегата, а також рівень води у водосховищі.

Вихідні діагностичні висновки повинні відповідати основним чинникам [1], що викликають вібрацію гідроагрегату, а саме: нерівноваженість ротора; порушення жорсткості опорної системи; дефекти турбінного і опорно-упорного підшипників; вібрація електричних машин електромагнітного походження; порушення гідродинаміки потоку. Діагностичні та прогнозні висновки в САДП-РДГ здійснюються за допомогою штучної *нейроподібної* мережі (ШНМ) [6, 7].

Для забезпечення адекватних діагностичних та прогнозних висновків кожна смуга АЧЧС кожного з вібросигналів має бути спочатку розділена на складові, які відповідають певним чинникам вібрації, а саме: внутрішнім чинникам, тобто механічним дефектам гідроагрегату, і зовнішнім чинникам, тобто електричному навантаженню гідрогенератора, напору води у водосховищі та фоновій вібрації інших агрегатів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ФОНОВИХ, ЕЛЕКТРО- ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ СКЛАДОВИХ АЧЧС ВІБРОСИГНАЛУ

Виходячи із загальних міркувань, можна записати [7]

$$|d_j| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j H^2}, \quad (1)$$

де $|d_j|$ — модуль вейвлет-коефіцієнта j -ої смуги частот в певний момент часу; d_j^* — значення вейвлет-коефіцієнта j -ої смуги частот в певний момент часу, яке викликано власними механічними дефектами гідроагрегату; H — рівень води у водосховищі; P — потужність навантаження гідрогенератора; D_{0xj} — фонове значення вейвлет-коефіцієнта j -ої смуги частот в певний момент часу; v_j — узагальнений числовий коефіцієнт, що характеризує залежність вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот від потужності навантаження; p_j, q_j — узагальнені числові коефіцієнти, що характеризують залежність вейвлет-коефіцієнтів j -ї смуги частот від рівня води у водосховищі.

Визначимо спочатку фонові значення складових АЧЧС (для кожної смуги частот) для зупиненого 3-го гідроагрегату. Ми будемо називати *фоновими* спектральні складові вібросигналу, коли гідроагрегат, для якого проводиться діагностування, з якихось причин зупинений, а інші агрегати Дністровської ГЕС-2 працюють. В цьому випадку вібросигнали генеруються працюючими гідроагрегатами і через будівальні конструкції передаються на зупинений гідроагрегат, де і фіксуються його вібросенсорами.

Враховуючи всі можливі комбінації варіантів роботи гідроагрегатів, необхідно сформувати матрицю $D_{0xj} = \{D_{01j}, D_{02j}, D_{012j}\}$, де D_{01j} — вектор фонових значень складових вібросигналу, якщо працює лише 1-й гідроагрегат, D_{02j} — вектор фонових значень складових вібросигналу, D_{012j} — вектор фонових значень складових вібросигналу, якщо працюють 1-й та 2-й гідроагрегати одночасно.

Кожен з цих параметрів (наприклад, D_{01j}) визначають як середнє значення модулів вейвлет-коефіцієнтів за період роботи лише 1-го гідроагрегату, тобто

$$D_{01j} = \frac{\sum |d_j|}{N}, \quad (2)$$

де $\sum |d_j|$ — сума модулів вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот за період роботи лише 1-го гідроагрегату (включаючи ті, що повторюються); N — кількість модулів вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот за період роботи лише 1-го гідроагрегату.

Для подальшого відокремлення електродинамічної складової АЧЧС для кожної смуги частот необхідно визначити коефіцієнт v_j .

Виберемо два послідовних моменти часу t_1 та t_2 з однаковими значеннями H та різними значеннями потужності гідрогенератора P_1 та P_2 . Вважаючи, що фонові складові і складові, які викликані механічними дефектами, швидко не змінюються, згідно з виразом (1), запишемо

$$|d_{j1}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P_1 + \frac{1}{p_j + q_j H^2}; \quad (3)$$

$$|d_{j2}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P_2 + \frac{1}{p_j + q_j H^2}. \quad (4)$$

Тоді, якщо відняти від першого рівняння друге, одержимо $|d_{j1}| - |d_{j2}| = v_j P_1 - v_j P_2$, звідки

$$v_j = \frac{|d_{j1}| - |d_{j2}|}{P_1 - P_2}. \quad (5)$$

Якщо $v_j < 0$, цей параметр обнуляється. Цю процедуру слід протягом дослідної експлуатації час від часу повторювати і значення v_j усереднювати.

Аналогічно визначаються і коефіцієнти p_j , q_j , але, оскільки їх два, то ми повинні скласти систему рівнянь.

Для цього виберемо чотири послідовних моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4 з однаковими значеннями P та різними H_1, H_2, H_3, H_4 . Вважаючи, що фонові складові і складові, які викликані механічними дефектами швидко не змінюються, згідно з виразом (1) запишемо

$$|d_{j1}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j H_1^2}; \quad (6)$$

$$|d_{j2}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j H_2^2}; \quad (7)$$

$$|d_{j3}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j H_3^2}; \quad (8)$$

$$|d_{j4}| = D_{0xj} + d_j^* + v_j P + \frac{1}{p_j + q_j H_4^2}. \quad (9)$$

Віднявши від першого рівняння друге, а від третього четверте, отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} |d_{j1}| - |d_{j2}| = \frac{1}{p_j + q_j H_1^2} - \frac{1}{p_j + q_j H_2^2}; \\ |d_{j3}| - |d_{j4}| = \frac{1}{p_j + q_j H_3^2} - \frac{1}{p_j + q_j H_4^2}. \end{cases} \quad (10)$$

Усунувши змінні із знаменника, одержимо

$$\begin{cases} p^2 + pq(H_1^2 + H_2^2) + q^2 H_1^2 H_2^2 - q \frac{H_2^2 - H_1^2}{|d_{j1}| - |d_{j2}|} = 0; \\ p^2 + pq(H_3^2 + H_4^2) + q^2 H_3^2 H_4^2 - q \frac{H_4^2 - H_3^2}{|d_{j3}| - |d_{j4}|} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язання цієї системи виконується одним з ітераційних методів.

При цьому, якщо $p_j < 0 \wedge q_j < 0$, ці параметри обнулюються. Цю процедуру слід протягом дослідної експлуатації час від часу повторювати і значення p_j , q_j усереднювати.

На основі вищенаведеного побудовано алгоритм, блок-схему якого зображено на рис. 1.

Цей алгоритм був реалізований підпрограмою, в яку були введені архівні дані, що наведені в таблиці 1.

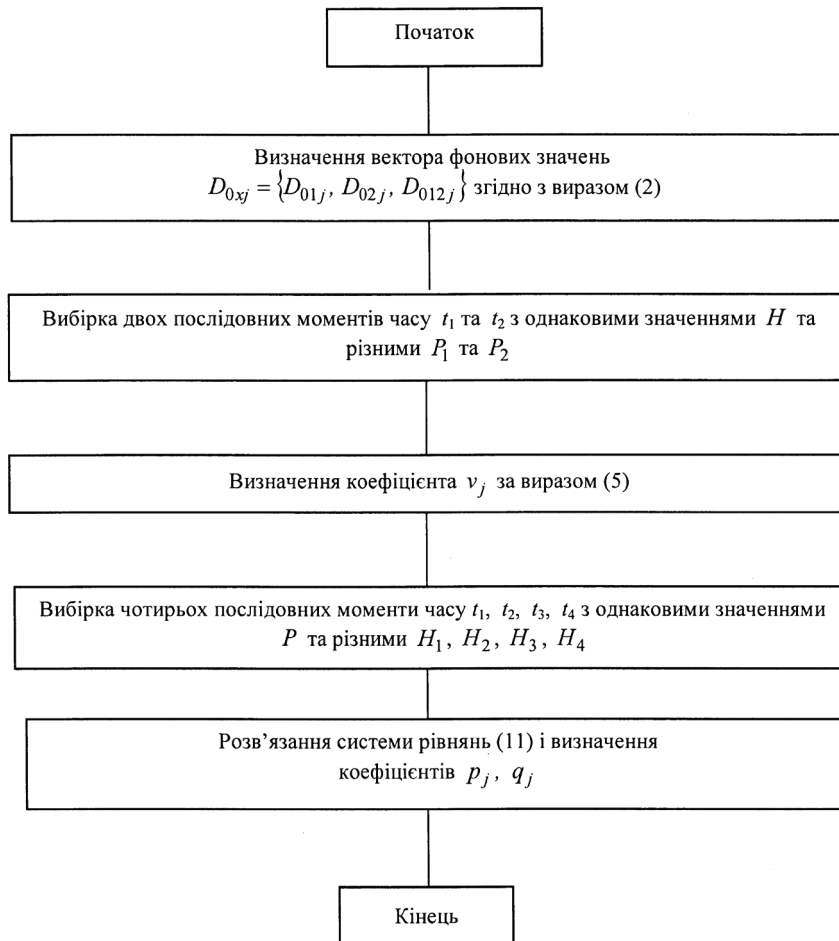


Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення складових АЧЧС

Результатами роботи підпрограми є вектори шуканих параметрів, тобто їх значення для кожної з 14-ти смуг частот. Ці вектори зведені в таблицю 2. Ці результати є попередніми і мають постійно уточнюватися протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ.

Таблиця 1.

Процедура		Напір, м	Потужність, МВт	Дата та час запису архівного файлу вібросигналу
Визначення фонових складових	Від 1-го агрегату	–	–	6.01.2012 від 1-00 до 18-00
	Від 2-го агрегату	–	–	5.01.2012 від 1-00 до 18-00
	Від обох агрегатів	–	–	28.01.2012 від 19-00 до 20-00
Визначення v		6,15	5,4	6.03.2012 9-00
		6,15	4	18.05.2012 15-00
Визначення p, q		6,5	4,8	21.05.2012 17-00
		6,4	4,8	1.02.2012 19-00
		5,55	4,8	6.03.2012 19-00
		5,5	4,8	14.05.2012 17-00

Таблиця 2.

Параметри		Вектор значень параметра
Фонові складові	Від 1-го агрегату	{0,03127; 0,04176; 0,03615; 0,02507; 0,06449; 0,07881; 0,08289; 0,17227; 0,30571; 0,08542; 0,08653; 0,06838; 0,03826; 0,00754}
	Від 2-го агрегату	{0,15568; 0,23978; 0,38381; 0,45569; 0,51336; 0,51071; 0,49748; 0,49705; 0,55044; 0,35927; 0,15250; 0,04728; 0,02226; 0,00685}
	Від обох агрегатів разом	{0,28008; 0,45449; 0,72585; 0,87523; 0,96223; 0,006157680,94261; 0,91208; 0,82182; 0,79517; 0,63311; 0,21847; 0,02619; 0,00627}
v		{0,418; 0,131; 0,496; 0,242; 0; 0,218; 0,56; 0,131; 0; 0; 0,098; 0,0055; 0; 0}
p		{0,187; 1,406; 1,104; 2,05; 1,78; 3,24; 0,158; 0,21; 0,927; 0,183; 0,417; 15,9; 7,69; 15,8}
q		{0,005; 0,174; 0,171; 0,17; 0,192; 0,189; 0,01; 0,005; 0,18; 0,006; 0,006; 0,181; 0,006; 0,007}

ВИСНОВКИ

1. Фонові складові АЧЧС, що викликані 1-м гідроагрегатом суттєво нижчі ніж складові, які викликані 2-м гідроагрегатом.

Це може мати місце внаслідок таких причин:

1.1. Перший гідроагрегат знаходиться на більшій відстані від третього, ніж другий, тому його віброакустичний сигнал швидше згасає.

1.2. Особливості конструкції другого гідроагрегату призводять до більшої вібрації.

1.3. Більшого електричного навантаження чи меншого рівня води у водосховищі на другому гідроагрегаті під час архівних вимірювань.

2. Сумарні фонові складові АЧЧС, що викликані 1-м та 2-м гідроагрегатами одночасно, не є арифметичною сумою складових, викликаних цими гідроагрегатами окремо.

Це, скоріш за все, викликано тим, що фонові складові АЧЧС для окремих гідроагрегатів та для їх одночасної роботи визначалися для різних проміжків часу (див. табл. 3.3), при різних значеннях електричного навантаження та рівня води у водосховищі.

3. Коефіцієнт v_j , який задає залежність електродинамічної складової АЧЧС від електричного навантаження, має нульові значення на 5-й, 9-й, 10-й, 13-й та 14-й смугах частот.

Тому, ці номери смуг частот можна не включати в апріорну множину смуг частот Q , яка задається для шостого нейрона. Звичайно, ця множина повинна постійно уточнюватися протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ.

4. Коефіцієнти p_j , q_j , які задають залежність гідродинамічної складової АЧЧС від рівня води у водосховищі, на всіх смугах частот мають ненульові значення.

Тому, на початку дослідної експлуатації САДП-РДГ має сенс включати в апіорну множину смуг частот Q , яка задається для п'ятого нейрона, всі смуги частот, і надалі проводити постійне уточнення цих коефіцієнтів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ширман А. Р. Практическая вибродіагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев — Москва, 1996. — 276 с.
2. Кухарчук В. В. Дослідження результатів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналу при коефіцієнті стискання 2 та різних материнських вейвлетах / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. — 2011. — № 2. — С. 66—69.
3. Кухарчук В. В. Оцінка ефективності алгоритмів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів з різними коефіцієнтами стискання / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 4. — С. 151—154.
4. Кухарчук В. В. Частотна ідентифікація масштабних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. — 2012. — № 1. — С. 138—142.
5. Кухарчук В. В. Система автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідрогенераторів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров, І. К. Говор, В. Я. Ніколаєв // Вісник Інженерної Академії України. — 2009, № 2. — С. 126—132.
6. Кухарчук В. В. Принципи побудови штучної нейронної мережі системи автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2012. — № 1 (23). — С. 42—47.
7. Каців С. Ш. Штучна нейроподібна мережа для діагностування дефектів гідроагрегатів / С. Ш. Каців // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2013 — № 1. — С. 74—83.

Надійшла до редакції 15.12.2014 р.

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

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

УСОВ ВІКТОР ВОЛОДИМИРОВИЧ — к. т. н., доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ГОВОР ІГОР КОСТЯНТИНОВИЧ — асистент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

БИКОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна