

В. В. Кухарчук¹
С. Ш. Каців¹
В. Г. Мадьяров¹
І. А. Жук²
С. О. Биковський¹

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ ЗА РІЗНИХ МАТЕРИНСЬКИХ ВЕЙВЛЕТІВ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Дністровська ГАЕС

Порівняно тренди амплітудно-частотно-часового спектру віброцигналу для окремих частотних смуг і результати прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату для однакових проміжків часу за різних материнських вейвлетів: Добеші, Мейера та Беттла–Лемарьє. Встановлено, що незважаючи на певну відмінність цих трендів, ієрархія показників вірогідності чинників вібрації не змінюється.

Ключові слова: дискретне вейвлет-перетворення, тренд амплітудно-частотно-часового спектру, материнський вейвлет, масштабна функція, чинник вібрації, показник вірогідності.

Вступ

Система автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів (САДП-РДГ) призначена для забезпечення безаварійної роботи гідроагрегатів Дністровської ГЕС-2 [1, 2]. САДП-РДГ є апаратно-програмним комплексом, який складається з чотирьох вимірювальних каналів вібрації, підсистеми поточного моніторингу вібрації та підсистеми діагностування і прогнозування.

Вимірювальні канали вібрації та підсистема поточного моніторингу успішно функціонують на Дністровській ГЕС-2. Підсистема діагностування і прогнозування поступово впроваджується в дослідну експлуатацію.

В основу алгоритмів САДП-РДГ покладені такі принципові підходи:

1. Застосування математичного апарату вейвлет-перетворень для спектрального аналізу віброцигналів, що дає можливість отримати тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр віброцигналу зі змінною шириною вікна і забезпечити оптимальну роздільну здатність спектральних характеристик [1, 3, 4].

2. Застосування нейромережевої технології отримання діагностичних та прогнозних висновків стосовно наявності та розвитку конструктивних дефектів об'єкта, що дозволяє створити автоматизовану комп'ютеризовану систему діагностування та прогнозування дефектів, яка буде здатна до самостійного настроювання у разі зміни спектральних характеристик [1]. Для цього формується штучна нейроподібна мережа (ШНМ).

Кожен з отриманих віброакустичних сигналів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) розкладається в амплітудно-частотно-часовий спектр (АЧЧС).

Для здійснення прогнозування розвитку конструктивних дефектів гідроагрегату формуються тренди кожної смуги частот АЧЧС кожного з віброцигналів. Для побудови тренду з кожного рядка АЧЧС, який відповідає окремому стеку даних і півхвилиному інтервалу часу, вибирається максимальне (за абсолютною величиною) значення вейвлет-коефіцієнта.

Далі цей тренд аналізується протягом відносно значного проміжку часу, наприклад, доби (розмір цього проміжку повинен бути уточнений під час дослідної експлуатації САДП-РДГ). Якщо в результаті аналізу спостерігається впевнене зростання максимального значення вейвлет-коефіцієнтів деяких смуг частот АЧЧС, то ці тренди відповідним чином обробляються [1].

Очевидно, що ШНМ спрацьовує лише у випадку, коли існує хоча б один зростаючий тренд.

Під час промислової експлуатації підсистеми поточного моніторингу накопичені значні архівні масиви вібросигналів.

Попередні прогностичні висновки, що базуються на цих архівних масивах вібросигналів, отримані із застосуванням в ДВП вейвлетів Добеші [1]. Доцільно провести порівняльний аналіз трендів АЧЧС вібросигналів і результатів прогнозування розвитку дефектів гідроагрегату за різних типів материнських вейвлетів, що й буде розглянуто далі.

Побудова різних типів материнських вейвлетів

Нагадаємо [1, 3], що математичні моделі і алгоритми дискретного вейвлет-перетворення базуються на математичному апараті кратномасштабного аналізу.

В основу кратномасштабного аналізу покладено ортонормальний базис, що складається з двох функцій: масштабної функції $\phi(x)$ та материнського (базисного) вейвлету $\psi(x)$.

З коефіцієнтом стискання 2 масштабна функція має відповідати співвідношенню

$$\phi(x) = \sqrt{2} \sum_{i=0}^{N-1} h(i) \phi(2x-i), \quad (1)$$

де $h(N)$ — вектор коефіцієнтів, які однозначно характеризують масштабну функцію.

Ця функція забезпечує на кожному кроці подвійну зміну масштабу.

На основі функції $\phi(x)$ будують материнський вейвлет $\psi(x)$ за формулою

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_{i=0}^{N-1} g(i) \phi(2x-i), \quad (2)$$

де $g(N)$ — вектор коефіцієнтів, які однозначно характеризують материнський вейвлет.

Вектор коефіцієнтів $g(N)$ визначають так:

$$\forall i = 0, N-1 \left(g(i) = (-1)^i h(N-1-i) \right). \quad (3)$$

З коефіцієнтом стискання 2 масштабовані та зміщені масштабна функція і материнський вейвлет записуються як

$$\phi_{j,i}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \phi(2^j x - i); \quad \psi_{j,i}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - i). \quad (4)$$

Для реалізації алгоритму ДВП безпосередньо масштабна функція $\phi(x)$ та материнський вейвлет $\psi(x)$ не використовуються, їх цілком замінюють вектори коефіцієнтів $h(N)$ та $g(N)$.

Розглянемо побудову векторів коефіцієнтів $h(N)$ для материнських вейвлетів Добеші, Мейєра та Беттла–Лемарьє.

Материнський вейвлет Добеші

Алгоритм визначення вейвлетів Добеші є відносно простим, оскільки зводиться до розв'язання систем алгебраїчних рівнянь.

Розглянемо принципи складання необхідної системи алгебраїчних рівнянь та її розв'язання на прикладі визначення вектора коефіцієнтів $h(N)$ для материнського вейвлету Добеші D^4 (тобто $N=4$), коли коефіцієнт стискання 2.

З властивості ортогональності масштабних функцій

$$\int \phi(x) \phi(x-m) dx = \delta_{0m}, \quad (5)$$

де δ_{0m} — символ Кронекера, та рівняння (1) випливає:

$$\sum_i h(i) h(i+2m) = \delta_{0m}. \quad (6)$$

Умова ортогональності материнського вейвлету поліномам до степеня $L-1$ $\left(L = \frac{N}{2}\right)$, що визначає його гладкість,

$$\forall n = 0, L-1 \left(\int x^n \psi(x) dx = 0 \right) \quad (7)$$

зводиться до співвідношення

$$\sum_i i^n g(i) = 0 \quad (8)$$

або з урахуванням (3)

$$\sum_i (-1)^i i^n h(i) = 0. \quad (9)$$

Умова нормування масштабної функції

$$\int \phi(x) dx = 1 \quad (10)$$

дає ще одне рівняння

$$\sum_i h(i) = \sqrt{2}. \quad (11)$$

Запишемо тепер систему рівнянь для материнського вейвлету D^4 в явному вигляді

$$\begin{aligned} h_0 h_2 + h_1 h_3 &= 0; \\ h_0 - h_1 + h_2 - h_3 &= 0; \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 &= 0; \\ h_0 + h_1 + h_2 + h_3 &= \sqrt{2}, \end{aligned} \quad (12)$$

з якої можна визначити вектор коефіцієнтів $h(N)$.

Материнський вейвлет Мейера

Алгоритм визначення вейвлетів Мейера набагато складніший ніж попередній, тому не будемо наводити його повністю [4, 5, 6]. Значимо лише, що в ньому використовується допоміжна функція

$$v(x) = \begin{cases} 0 & (x < 0); \\ 10x^3 - 15x^4 + 6x^5 & (0 \leq x < 1); \\ 1 & (x \geq 1). \end{cases} \quad (13)$$

Перетворення Фур'є масштабної функції приймається у вигляді

$$\phi(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(|\xi| < \frac{2\pi}{3} \right); \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos \left[\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3}{2\pi} |\xi| - 1 \right) \right] \left(\frac{2\pi}{3} \leq |\xi| < \frac{4\pi}{3} \right); \\ 0 \left(|\xi| \geq \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases} \quad (14)$$

Після низки перетворень отримують значення вектора коефіцієнтів $h(N)$

$$h_k = h_{-k} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi} \phi(2\xi) \cos(k\xi) d\xi. \quad (15)$$

Цей вейвлет є симетричним.

Материнський вейвлет Бетгла–Лемарьє

Цей вейвлет відноситься до класу сплайн-вейвлетів [4, 5, 6]. Алгоритм його визначення теж складний та трудомісткий і не буде наведений повністю. Він базується на так званих В-сплайнах.

Наприклад, кубічний В-сплайн виглядає так:

$$B_3(x) = \begin{cases} \frac{1}{6}x^3 (0 \leq x < 1); \\ \frac{2}{3} - 2x + 2x^2 - \frac{1}{2}x^3 (1 \leq x < 2); \\ B_3(4-x)(2 \leq x < 4); \\ 0 (\text{інакше}). \end{cases} \quad (16)$$

Далі за рекурентною процедурою визначаються низка поліномів $p_n(\cos(\xi))$ і допоміжні коефіцієнти

$$q_k = q_{-k} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{\frac{p_n(\cos(\xi))}{p_n(\cos(2\xi))}} \cos(k\xi) d\xi. \quad (17)$$

Нарешті,

$$h_r = h_{n+1-r} = \frac{\sqrt{2}}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{n+1} \binom{n+1}{l} q_{r-l}. \quad (18)$$

Експериментальні дослідження

На рис. 1—3 зображені тренди АЧЧС віброцигналу для шостої (генераторної) смуги частот відповідно при вейвлетах Добеші, Мейєра та Бетгла-Лемарьє. Через обмежений обсяг статті, тренди інших смуг частот не показані.

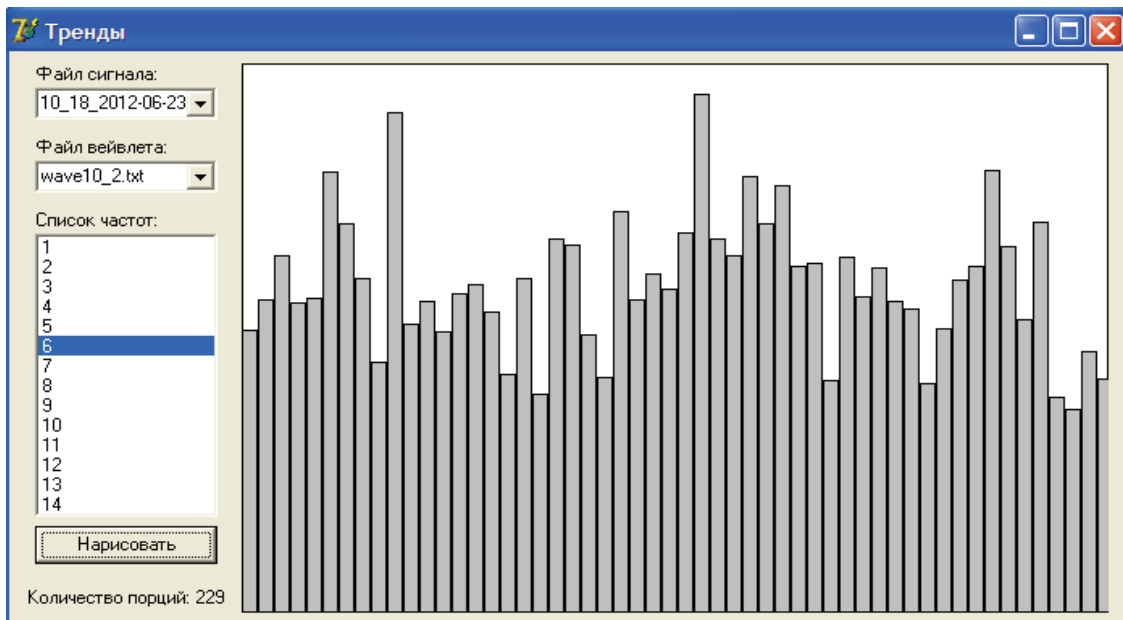


Рис. 1. Тренд АЧЧС віброцигналу для шостої смуги частот при вейвлеті Добеші

Зазначимо, що тренди АЧЧС віброцигналу для різних материнських вейвлетів не дуже відрізняються один від одного.

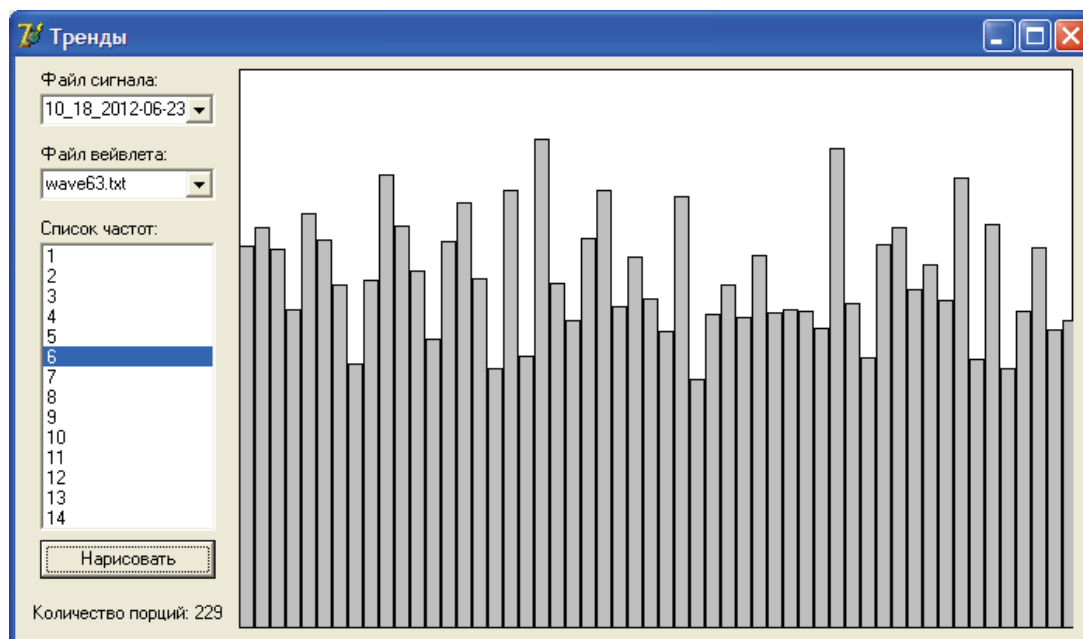


Рис. 2. Тренд АЧЧС вібросигналу для шостої смуги частот при вейвлеті Мейера

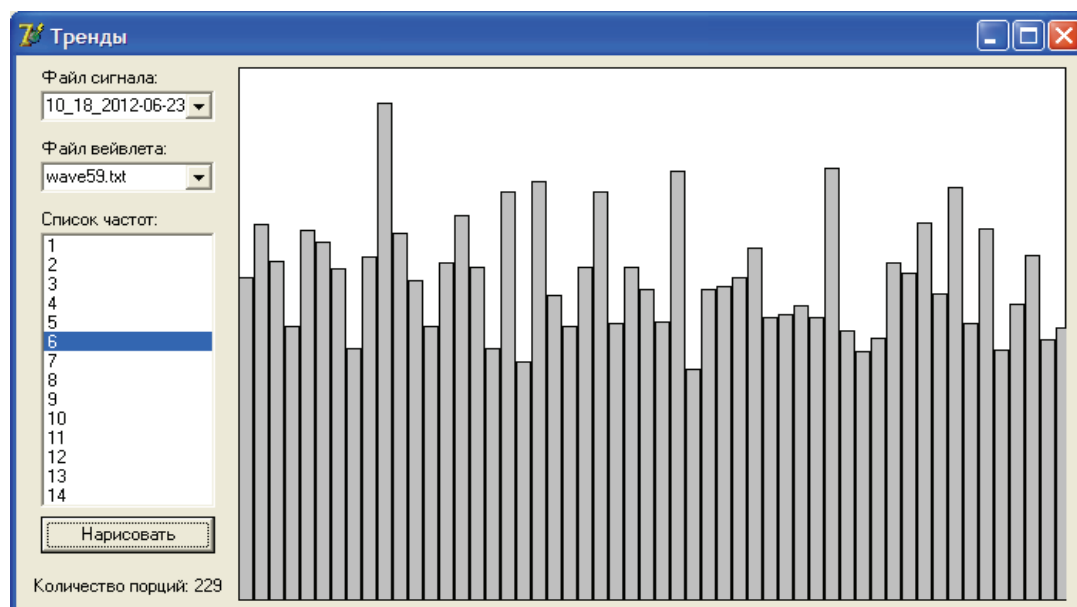


Рис. 3. Тренд АЧЧС вібросигналу для шостої смуги частот при вейвлеті Беттла-Лемарьє

Розглянемо тепер, як за різних вейвлетів змінюються прогностні висновки.

Нагадаємо [1], що причиною вібрації є одночасна дія усіх без винятку чинників, тому прогностний висновок полягає у встановленні деякої ієрархії небезпеки цих чинників для гідроагрегату.

Слід зазначити, що чинники вібрації поділяються на механічні (неврівноваженість ротора, порушення жорсткості опорної системи, дефекти підшипників), електродинамічні та гідродинамічні. При цьому, зростання механічних складових АЧЧС вібросигналу однозначно свідчить про розвиток механічних дефектів гідроагрегату, водночас зростання електродинамічної складової АЧЧС ще не означає погіршення стану обмоток або магнітної системи гідрогенератора, а зростання гідродинамічної складової АЧЧС не означає погіршення стану лопатей турбіни. Про погіршення стану обмоток або магнітної системи гідрогенератора можна казати лише у випадку, якщо зростання електродинамічної складової АЧЧС не супроводжується зростанням електричного навантаження генератора. Аналогічно, погіршення стану лопатей турбіни має місце, якщо зростання гідродинамічної складової АЧЧС відбувається при сталому напорі води.

В таблиці наведені показники вірогідності (%) впливу чинників вібрації на вібросигнал за різних материнських вейвлетів.

Показники вірогідності (%) впливу чинників вібрації на вібросигнал

Чинник вібрації	Вейвлет Добеши	Вейвлет Майера	Вейвлет Бэттла-Лемарье
Неврівноваженість ротора	4	6	4
Порушення жорсткості опорної системи	5	8	7
Дефекти турбінного підшипника	100	100	100
Дефекти опорно-упорного підшипника	75	70	72
Порушення гідродинаміки потоку	15	13	13
Вібрація електромагнітного походження	17	14	15

Аналіз вищенаведених результатів показує, що вони не суттєво відрізняються одне від одного. Також зберігається ієрархія безпеки цих чинників.

Висновки

1. Тренди АЧЧС, отримані за допомогою ДВП з різними материнськими вейвлетами, не суттєво відрізняються один від одного.

2. Показники вірогідності впливу чинників вібрації на вібросигнал за різних материнських вейвлетів також не суттєво відрізняються один від одного, при цьому зберігається ієрархія безпеки цих чинників.

3. Вибір найадекватнішого материнського вейвлету має бути здійснений під час дослідної експлуатації САДП-РДГ при настроюванні ШНМ. При цьому, під час кожного чергового або позачергового технічного огляду гідроагрегату відповідальними особами обслуговуючого персоналу ГЕС (які в цьому випадку виконують функцію експертів) визначається рівень зношеності основних вузлів гідроагрегату. Після цього далі особа, яка має відповідати за функціонування САДП-РДГ, порівнює висновки експертів з архівними даними рівнів вірогідності різних чинників вібрації та трендами АЧЧС, і приймає рішення щодо вибору материнського вейвлету, уточнення множин номерів смуг частот і вагових коефіцієнтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія / [В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. В. Усов та ін.]. — Вінниця : ВНТУ, 2013. — 169 с.
2. Kukharchuk V. V. Diagnostics and forecasting of hydro units faults / V. V. Kukharchuk, S. Sh. Kazyv // Khoa hoc & Công nghệ. — 2012 — № 8 (57). — p. 122—126.
3. Discrete wavelet transformation in spectral analysis of vibration processes at hydropower units / [Vasyl V. Kukharchuk, Samoil Sh. Kazyv, Sergey A. Bykovsky and other] // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications 2016. — P. 65—68. — doi:10.15199/1.2016.
4. Порівняння результатів діагностування дефектів гідроагрегатів при різних материнських вейвлетах / [В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров та ін.] // Вісник Інженерної Академії України. — 2017. — № 1. — С. 197—203.
5. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер. — М. : Техносфера, 2004. — 280 с.
6. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. — М. : Мир, 2005. — 671 с.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.09.2017

Кухарчук Василь Васильович — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

Каців Самоїл Шулімович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, e-mail: katsyv@ukr.net ;

Мадьяров Вячеслав Губейович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

Биковський Сергій Олександрович — здобувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Жук Ігор Анатолійович — канд. техн. наук, начальник цеху технологічної автоматики та засобів зв'язку Дністрівська ГАЕС

V. V. Kuharchuk¹
S. Sh. Katsyv¹
V. G. Madiarov¹
I. A. Zhuk²
S. O. Bykovskiy¹

Comparison of Results of Forecasting of Development of Defects of Hydrounits at Different Parent Wavelets

¹Vinnytsia National Technical University

²Dnistrovskiy HAES

In this work the trends of a peak-time-and-frequency spectrum of vibrating signals for separate frequency strips and results of forecasting of development of defects of the hydrounit for identical time intervals are compared at different parent wavelets, like Dobeshi, Meyer and Bettla-Lemare. It is established that despite certain difference of these trends, the hierarchy of indicators of reliability of the reasons of vibration does not change.

Keywords: discrete wavlet-transformation, trend of peak-time-and-frequency spectrum, parent wavelets scale function, vibration reason, reliability indicator.

Kuharchuk Vasil V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measurements;

Katsyv Samoil Sh. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measurements, e-mail: katsyv@ukr.net;

Madiarov Viacheslav G. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measurements;

Zhuk Ihor A. — Cand. Sc. (Eng.), Chief of the Sector of Technological Automatics and Communication Facilities of Dnistrovskiy HAES;

Bykovskiy Sergii O. — Researcher of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measurements

В. В. Кухарчук¹
С. Ш. Кацев¹
В. Г. Мадьяров¹
И. А. Жук²
С. А. Быковский¹

Сравнение результатов прогнозирования развития дефектов гидроагрегатов при разных материнских вейвлетах

¹Винницкий национальный технический университет;

²Днестровская ГАЭС

Выполнено сравнение трендов амплитудно-частотно-временного спектра вибросигнала для отдельных частотных полос и результатов прогнозирования развития дефектов гидроагрегата для одинаковых промежутков времени при разных материнских вейвлетах — Добеши, Мейера и Беттла-Лемарье. Установлено, что несмотря на определенное отличие этих трендов, иерархия показателей достоверности причин вибрации не меняется.

Ключевые слова: дискретное вейвлет-преобразование, тренд амплитудно-частотно-временного спектра, материнский вейвлет, масштабная функция, причина вибрации, показатель достоверности.

Кухарчук Василий Васильевич — д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений;

Кацев Самоил Шулимович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, e-mail: katsyv@ukr.net ;

Мадьяров Вячеслав Губеевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений;

Жук Игорь Анатолієвич — канд. техн. наук, начальник цеха технологической автоматки и средств связи Днестровской ГАЭС;

Быковский Сергей Александрович — соискатель кафедры теоретической электротехники и электрических измерений