

**В. В. Кухарчук**, д.т.н.  
**С. Ш. Каців**, к.т.н.  
**В. Г. Мадьяров**, к.т.н.  
**І. А. Жук**, к.т.н.  
**С. О. Биковський**

## ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТІВ ПРИ РІЗНИХ МАТЕРИНСЬКИХ ВЕЙВЛЕТАХ

Вінницький національний технічний університет, e-mail: katsyv@ukr.net

*В цій роботі порівнюються зрізи амплітудно-частотно-часового спектру вібросигналу і результати діагностування існуючих дефектів гідроагрегату для однакових моментів часу з надмірним віброзміщенням при різних материнських вейвлетах – Добеші, Мейера та Беттла-Лемарьє. Показано, що незважаючи на певну відмінність цих зрізів, ієрархія показників вірогідності чинників вібрації не змінюється.*

**Ключові слова:** дискретне вейвлет-перетворення, зріз 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 базується на модифікованій частотній технології вібродіагностування і 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 впроваджені у промислову експлуатацію 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 вібросигналів, що дає можливість отримати тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр вібросигналу 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 при зміні спектральних характеристик [1, 5]. 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).

На вхід ШНМ надходять такі дані:

- всі значення віброзміщення, що перевищують припустиму норму, по кожному вібросенсору за певний інтервал часу з часовою фіксацією цих значень;
- АЧЧС, що відповідають кожному з вищезгаданих віброакустичних сигналів за цей же інтервал часу;
- значення потужності навантаження гідрогенератора за цей же інтервал часу з часовою фіксацією;
- значення рівня води за цей же інтервал часу з часовою фіксацією.

Діагностичний блок САДП-РДГ повинен спрацьовувати тоді, коли максимум віброзміщення хоча б для одного вібросигналу перевищує допустиме значення (160 мкм).

В цьому випадку мають бути визначені ті смуги частот у відповідній матриці вейвлет-коефіцієнтів (МВК), вейвлет-коефіцієнти яких є найбільшими в спектрі і на основі цієї інформації треба діагностувати одну чи декілька причин виникнення неприпустимого віброзміщення.

Під час промислової експлуатації підсистеми поточного моніторингу накопичені значні архівні масиви вібросигналів, в процесі впровадження підсистеми діагностування і прогнозування в дослідну експлуатацію визначаються і уточнюються різноманітні коефіцієнти, які необхідні для настроювання ШНМ

Разом з тим, попередні діагностичні висновки, що базуються на цих архівних масивах вібросигналів, були отримані при застосуванні в ДВП вейвлетів Добеші [1]. Доцільно провести порівняльний аналіз зрізів АЧЧС вібросигналів і результатів діагностування існуючих дефектів гідроагрегату при різних типах материнських вейвлетів, що й буде розглянуто далі.

### Побудова різних типів материнських вейвлетів

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

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

При коефіцієнті стискання 2 масштабна функція повинна відповідати співвідношенню

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

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

Ця функція забезпечує на кожному кроці подвійну зміну масштабу.

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

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

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

Вектор коефіцієнтів  $g(N)$  визначають так:

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

При коефіцієнті стискання 2 масштабовані та зміщені масштабна функція і материнський вейвлет записуються як

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

Для реалізації алгоритму ДВП безпосередньо масштабна функція  $\varphi(x)$  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, Мейера та Бетгла-Лемарьє.

*Материнський вейвлет Добеші.*

Алгоритм визначення вейвлетів Добеші є відносно простим, оскільки зводяться 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  $D^6$  ( $N = 6$ ) при коефіцієнті стискання 2.

З властивості ортогональності масштабних функцій

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

де  $\delta_{0m}$  – символ Кронекера, та рівняння (1) випливає

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

Оскільки  $N = 6$ , то параметр  $m$  у виразі (7) може набувати лише двох значень:  $m = 1$  та  $m = 2$ . Тоді цей вираз розщеплюється на підсистему, яка складається з двох рівнянь:

$$\begin{aligned} h_0 h_2 + h_1 h_3 + h_2 h_4 + h_3 h_5 &= 0, \\ h_0 h_4 + h_1 h_5 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\forall n = 0, L-1 \left( \int x^n \psi(x) dx = 0 \right) \quad (8)$$

зводиться до співвідношення  $\sum_i i^n g(i) = 0$  або з урахуванням (3)

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

Оскільки в цьому випадку  $L = 3$ , то  $n = 0, 1, 2$  і цей вираз розщеплюється на підсистему, яка складається з трьох рівнянь:

$$\begin{aligned} h_0 - h_1 + h_2 - h_3 + h_4 - h_5 &= 0, \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 + 4h_4 - 5h_5 &= 0, \\ -h_1 + 2^2 h_2 - 3^2 h_3 + 4^2 h_4 - 5^2 h_5 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Умова нормування масштабної функції  $\int \varphi(x) dx = 1$  дає ще одне рівняння

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

Зведемо тепер вирази (7), (10), (11) в єдину систему

$$\begin{aligned} h_0 h_2 + h_1 h_3 + h_2 h_4 + h_3 h_5 &= 0, \\ h_0 h_4 + h_1 h_5 &= 0, \\ h_0 - h_1 + h_2 - h_3 + h_4 - h_5 &= 0, \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 + 4h_4 - 5h_5 &= 0, \\ -h_1 + 2^2 h_2 - 3^2 h_3 + 4^2 h_4 - 5^2 h_5 &= 0, \\ h_0 + h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 &= \sqrt{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

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

*Материнський вейвлет Мейера.*

Алгоритм визначення вейвлетів Мейера набагато складніший ніж попередній, тому ми не будемо наводити його повністю [6, 7]. Зазначимо 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

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

Додатково вводиться функція

$$H(\xi) = \sqrt{2\pi} \sum_l \hat{\varphi}(2\xi + 4\pi l). \quad (15)$$

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

$$h_k = h_{-k} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi} \hat{\phi}(2\xi) \cos(k\xi) d\xi. \quad (16)$$

Цей вейвлет є симетричним.

*Материнський вейвлет Беттла-Лемарьє.*

Цей вейвлет відноситься до класу сплайн-вейвлетів [6, 7]. Алгоритм його визначення теж складний та трудомісткий і не буде наведений повністю. Він базується на так званих В-сплайнах.

Наприклад, кубічний В-сплайн виглядає як

$$B_3(x) = \begin{cases} \frac{1}{6} x^3 & (0 \leq x < 1), \\ \frac{2}{3} - 2x + 2x^2 - \frac{1}{2} x^3 & (1 \leq x < 2), \\ B_3(4-x) & (2 \leq x < 4), \\ 0 & (\text{інакше}). \end{cases} \quad (17)$$

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

$$q_k = q_{-k} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{\frac{p_n(\cos(\xi))}{p_n(\cos(2\xi))}} \cos(k\xi) d\xi. \quad (18)$$

Нарешті,

$$h_r = h_{n+1-r} = \frac{\sqrt{2}}{2^{n+1}} \sum_{l=0}^{n+1} \binom{n+1}{l} q_{r-l}. \quad (19)$$

### Експериментальні дослідження

На рис. 1 – 3 зображені зрізи АЧЧС віброцигналу для однакових моментів часу з надмірним віброзмещенням відповідно при вейвлетах Добеші, Мейера та Беттла-Лемарьє.

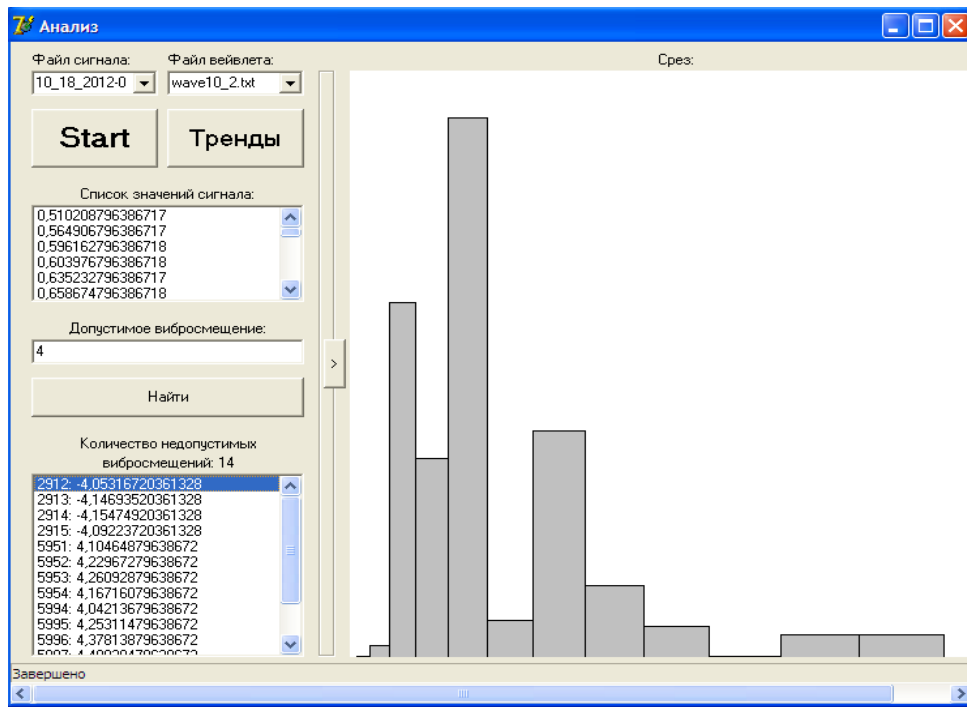


Рисунок 1 – Зріз АЧЧС віброцигналу при вейвлеті Добеші

Значимо, що у зрізі при вейвлеті Добеші найбільші значення відносяться до 3, 4, 5 та 7-ї смуг частот, що містяться в низькочастотному і, частково, середньочастотному діапазонах.

У зрізі при вейвлеті Мейера найбільші значення починаються із 8-ї смуги частот, тобто належать до середньочастотного та високочастотного діапазонів.

Вейвлет Беттла-Лемарьє забезпечує найбільші значення в 5 – 11 частотних смугах, а максимальне значення, як і при вейвлеті Добеші має місце у 5-й смугі частот.

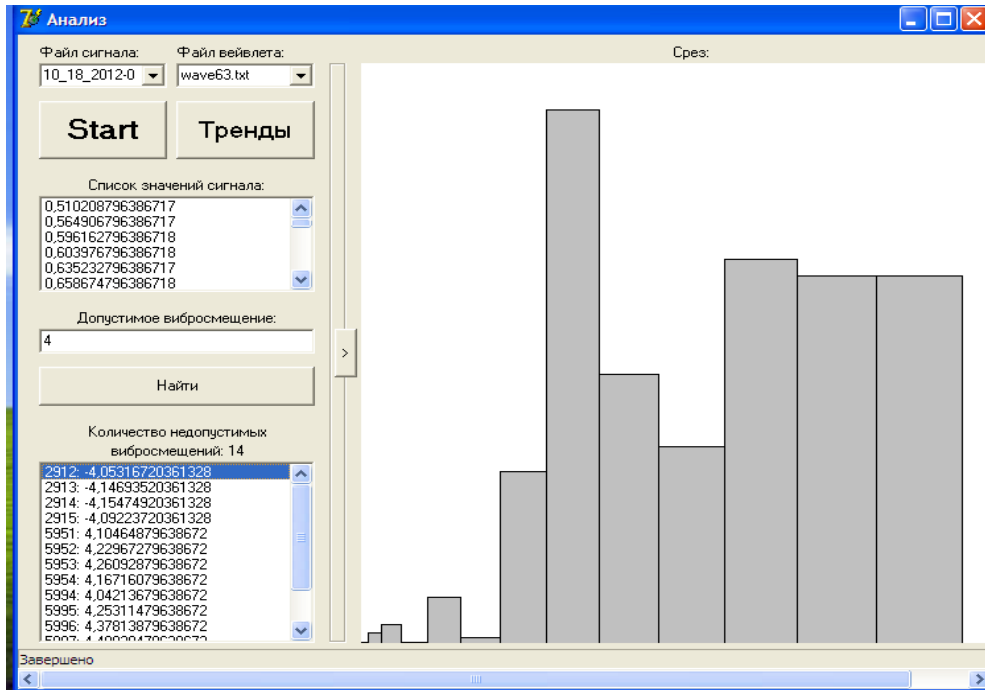


Рисунок 2 – Зріз АЧЧС вібросигналу при вейвлеті Мейера

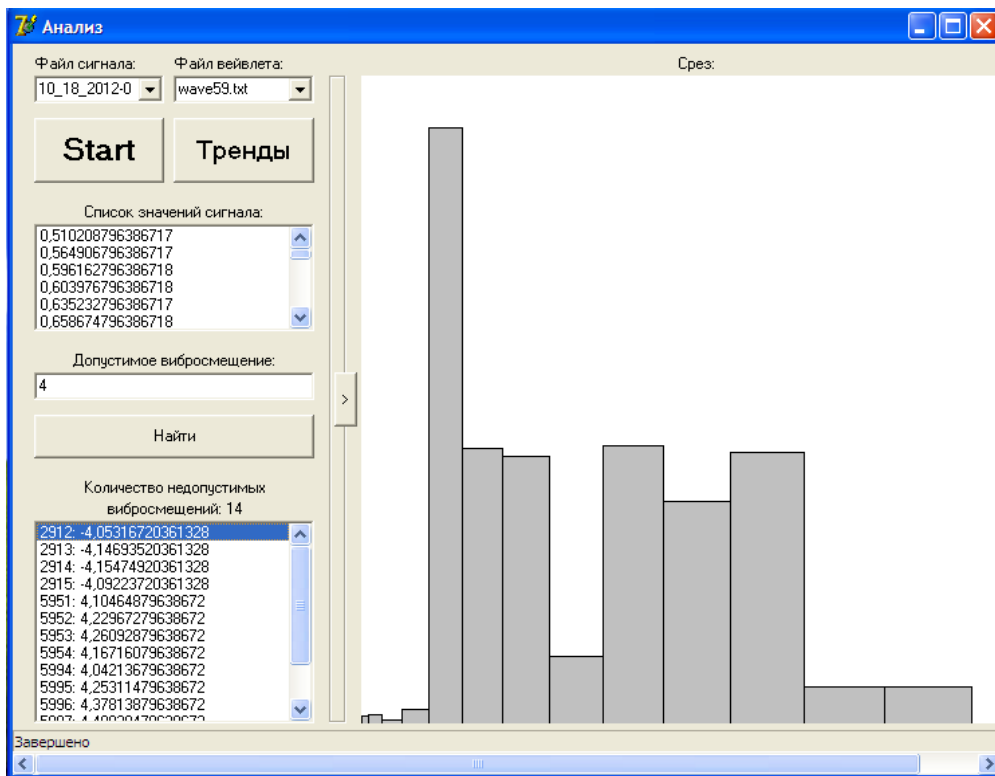


Рисунок 3 – Зріз АЧЧС вібросигналу при вейвлеті Беттла-Лемарьє

Отже, різні типи вейвлетів, природно, дають різний розподіл вейвлет-коефіцієнтів по смугах частот, при цьому симетричні вейвлети Мейера та Беттла-Лемарьє забезпечують більш рівномірний розподіл, ніж несиметричний вейвлет Добеші.

Розглянемо тепер, як при різних вейвлетах змінюються діагностичні висновки.

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

В таблиці 1 наведені показники вірогідності (%) впливу чинників вібрації на вібросигнал при різних материнських вейвлетах

Табл. 1 – Показники вірогідності (%) впливу чинників вібрації на вібросигнал

<i>Чинник вібрації</i>	<i>Вейвлет Добеші</i>	<i>Вейвлет Майера</i>	<i>Вейвлет Бэт-тла-Лемарьє</i>
<i>Неврівноваженість ротора</i>	4	8	4
<i>Порушення жорсткості опорної системи</i>	25	18	28
<i>Дефекти турбінного підшипника</i>	52	40	56
<i>Дефекти опорно-упорного підшипника</i>	60	46	68
<i>Порушення гідродинаміки потоку</i>	100	100	100
<i>Вібрація електромагнітного походження</i>	75	60	72

Аналіз вищенаведених результатів показує, що вони іноді досить суттєво відрізняються одне від одного. Разом з тим, зберігається ієрархія небезпеки цих чинників.

### **Висновки**

1. Зрізи АЧЧС, що отримані за допомогою ДВП з різними материнськими вейвлетами, містять різний розподіл вейвлет-коефіцієнтів по смугах частот, при цьому симетричні вейвлети Мейера та Беттла-Лемарьє забезпечують більш рівномірний розподіл, ніж несиметричний вейвлет Добеші.

2. Показники вірогідності впливу чинників вібрації на вібросигнал при різних материнських вейвлетах іноді досить суттєво відрізняються одне від одного, але, зазвичай, при цьому зберігається ієрархія небезпеки цих чинників.

3. Вибір найбільш адекватного 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, порівнює висновки експертів з архівними даними рівнів вірогідності різних чинників вібрації та перерізами АЧЧС, і приймає рішення щодо вибору вейвлету, уточнення множин номерів смуг частот і вагових коефіцієнтів.

### **Список літератури**

1. Кухарчук В.В. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів : монографія. / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, В. В. Усов та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 169 с.

2. V. V. Kukharchuk Diagnostics and forecasting of hydro units faults / V. V. Kukharchuk, S. Sh. Kazuyv // Khoa hoc & Công nghệ. – 2012 – №8 (57). – p. 122-126.

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

4. Кухарчук В.В. Частотна ідентифікація масштабних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2012 – №1. – с. 138-142.

5. Каців С. Ш. Штучна нейроподібна мережа для діагностування дефектів гідроагрегатів / С. Ш. Каців // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013 – № 1. – С. 74–83.
6. Блаттер К. Вэйвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер. – М. : Техносфера, 2004. – 280 с.
7. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.

#### АВТОРИ

**Кухарчук Василь Васильович** – д.т.н., професор, Україна, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, завідувач кафедри, тел.: (0432)-598444.

**Каців Самоїл Шулімович** – к.т.н., доцент, Україна, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, доцент кафедри, тел.: (0432)-598444.

**Мадьяров Вячеслав Губейович** – к.т.н., Україна, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, доцент кафедри, тел.: (0432)-598444.

**Жук Ігор Анатолійович** – к.т.н., Україна, м. Новодністровськ, Дністровська ГАЕС, нач. цеху технологічної автоматики та засобів зв'язку.

**Биковський Сергій Олександрович** – Україна, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, кафедра теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук.

УДК 681.518.3:621.311.214

Порівняння результатів діагностування дефектів гідроагрегатів при різних материнських вейвлетах / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Г. Мадьяров, І. А. Жук, С. О. Биковський  
Лл. 3. Бібл. 7

В цій роботі порівнюються зрізи амплітудно-частотно-часового спектру вібросигналу і результати діагностування існуючих дефектів гідроагрегату для однакових моментів часу з надмірним віброзміщенням при різних материнських вейвлетах – Добеші, Мейера та Беттла-Лемарьє. Показано, що незважаючи на певну відмінність цих зрізів, ієрархія показників вірогідності чинників вібрації не змінюється.

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

УДК 681.518.3:621.311.214

Сравнение результатов диагностирования дефектов гидроагрегатов при разных материнских вейвлетах / В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацыв, В. Г. Мадьяров, И. А. Жук, С. А. Быковский  
Илл. 3. Библ. 7

В этой работе сравниваются срезы амплитудно-частотно-временного спектра вибросигнала и результаты диагностирования существующих дефектов гидроагрегата для одинаковых моментов времени с недопустимым вибросмещением при разных материнских вейвлетах – Добеши, Мейера и Бэттла-Лемарье. Показано, что несмотря на различие этих срезов, иерархия показателей достоверности причин вибрации не изменяется.

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

UDC 681.518.3:621.311.214

Comparison of results of diagnosing of defects of hydrounits at different parent wavelets / V. Kuharchuk, S. Katsyv, V. Madyarov, I. Jook, S. Bykovsky  
Fig. 3. Bibl. 7

In this work cuts of a peak-time-and-frequency spectrum vibrating signal and results diagnosings of existing defects of the hydrounit for the identical moments of time with inadmissible vibrating displacement are compared at different parent wavelets – Dobeshy, Meyer and Bettl-Lemare. It is shown that despite distinction of these cuts, the hierarchy of indicators of reliability of the reasons of vibration does not change.

**Key words:** Discrete wavelets -transformation, cut of a peak-time-and-frequency spectrum, parent wavelet, scale function, the vibration reason, a reliability indicator.