

УДК 681.518.3

**В.В. Кухарчук, д.т.н., С.Ш. Каців, к.т.н.
І.К. Говор, С.О. Биковський****АНАЛІЗ ВІБРОСИГНАЛІВ ГІДРОАГРЕГАТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСКРЕТНОГО
ВЕЙВЛЕТ ПЕРЕТВОРЕННЯ З КОЕФІЦІЄНТОМ СТИСКАННЯ 2**

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

*В роботі розглянуті математична модель та алгоритм дискретного вейвлет-перетворення вібросигналу гідроагрегату і проведено попередній аналіз цього сигналу. Показано, що реальний вібросигнал має нестационарний характер і його спектр змінюється в часі.***Ключові слова:** дискретне вейвлет-перетворення, кратномасштабний аналіз, матриця вейвлет коефіцієнтів, масштабна функція, материнський вейвлет, коефіцієнт стискування.**Вступ**

Для аналізу вібросигналів найчастіше використовують його спектр – постачальник інформації про амплітудно-частотні зміни в сигналі при виникненні несправностей. В багатьох випадках достатньо обмежитися даними спектрального аналізу. Для виявлення характерних діагностичних ознак віброакустичний процес піддається попередній спектральній обробці, що дозволяє виявити зони і характер найбільших змін сигналу в частотній області [1].

В загальному випадку вібросигнал є нестационарним процесом і його амплітудно-частотний спектр змінюється в часі. В цих випадках застосовують частотно-часовий аналіз з використанням віконного (зваженого) перетворення Фур'є, який дає можливість отримати тривимірний амплітудно-частотно-часовий спектр сигналу. Головним недоліком віконного перетворення Фур'є є фіксований розмір вікна, тому воно дає прийнятні результати лише при аналізі певної зони спектру – низькочастотної чи високочастотної. Якщо існує потреба аналізувати весь спектр вібросигналу, то слід застосовувати перетворення зі змінною шириною вікна, тобто вейвлет-перетворення [2-5].

Метою роботи є розробка алгоритму вейвлет-перетворення, його програмна реалізація та подальший аналіз вібросигналів гідроагрегату.

Математична модель дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стискування 2

Якби існувала можливість отримання інформації про вібросигнал $f(t)$ в аналітичному вигляді, то його вейвлет-перетворення можна було б здійснити, задавшись певним материнським вейвлетом $\psi(t)$, за формулою

$$Wf(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad (1)$$

де ψ^* – спряжений материнський вейвлет, s – масштабний параметр, τ – часовий зсув.

Але, оскільки інформація про реальний вібросигнал завжди надходить в дискретному вигляді, то для його перетворення використовують дискретне вейвлет-перетворення (ДВП), яке базується на кратномасштабному аналізі [2, 3] (інші назви – мультироздільний аналіз [4], багатомасштабний аналіз [5]).

В основі кратномасштабного аналізу міститься ортонормальний базис, що складається з двох функцій: $\phi(x)$ та $\psi(x)$. Функцію $\phi(x)$ прийнято називати масштабною функцією (інакше – скейлінг-функцією). Якщо пов'язати цю функцію з її зсунутими та стиснутими модифікаціями, то можна записати

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

Ця функція забезпечує на кожному кроці подвійну змінену масштабу (тобто коефіцієнт стискування дорівнює 2). Вектор коефіцієнтів $h(N)$ однозначно характеризує масштабну функцію і саме він надалі використовується в алгоритмі ДВП.

Якщо функція $\phi(x)$ вже визначена, то можна побудувати функцію $\psi(x)$, яку називають материнським вейвлетом (або базисним вейвлетом).

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{N-1} g(k) \varphi(2x-k), \quad (3)$$

де $\forall k = 0, N-1 (g(k) = (-1)^k h(N-1-k))$ (4)

Вектор коефіцієнтів $g(N)$ однозначно характеризує материнський вейвлет і надалі використовується в алгоритмі ДВП.

Масштабовані та зміщені масштабна функція і материнський вейвлет записуються як

$$\varphi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \varphi(2^j x - k), \quad (5)$$

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - k). \quad (6)$$

Вони утворюють ортонормальний базис. Вибір масштабувального множника 2^j з цілими значеннями j призводить до однозначної та самоузгодженої процедури розрахунку вейвлет-коефіцієнтів.

В принципі існують алгоритми для побудови материнських вейвлетів для довільного раціонального коефіцієнту стискання замість 2, хоча лише для цього коефіцієнту стискання вдалося показати, що існує алгоритм, при якому гладкість материнського вейвлету лінійно зростає із зростанням його носія. Наприклад, при коефіцієнті стискання 3 ця гладкість зростає логарифмічно із зростанням області задання. Разом з тим, іноді буває доцільним, з різних міркувань, використання вейвлетів з іншими (зокрема, дробними) коефіцієнтами стискання, але в цій роботі такі випадки не розглядаються.

Алгоритми отримання векторів $h(N)$ та $g(N)$ в більшості випадків досить складні. Найпростішими з них є алгоритми визначення вейвлетів Добеші [4, 5], які зводяться до розв'язання систем алгебраїчних рівнянь.

Розглянемо приклад визначення вектору $h(N)$ для найпростішого материнського вейвлету Добеші D^4 (тобто $N = 4$).

З властивості ортогональності масштабних функцій

$$\int \varphi(x) \varphi(x-m) dx = \delta_{0m}, \quad (7)$$

де δ_{0m} – символ Кронекера, та рівняння (2) впливає

$$\sum_k h(k) h(k+2m) = \delta_{0m}. \quad (8)$$

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

$$\forall n = 0, L-1 \left(\int x^n \psi(x) dx = 0 \right) \quad (9)$$

зводиться до співвідношення

$$\sum_k k^n g(k) = 0 \quad (10)$$

або з урахуванням (4)

$$\sum_k (-1)^k k^n h(k) = 0. \quad (11)$$

Умова нормування масштабної функції $\int \varphi(x) dx = 1$

$$\int \varphi(x) dx = 1 \quad (12)$$

дає ще одне рівняння

$$\sum_k h(k) = \sqrt{2}. \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} h_0 h_2 + h_1 h_3 &= 0 \\ h_0 - h_1 + h_2 - h_3 &= 0 \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 &= 0 \\ h_0 + h_1 + h_2 + h_3 &= \sqrt{2} \end{aligned} \quad (14)$$

і розв'яжемо її в середовищі MathCAD.

Given

$$h_0 \cdot h_2 + h_1 \cdot h_3 = 0$$

$$h_0 - h_1 + h_2 - h_3 = 0$$

$$-h_1 + 2 \cdot h_2 - 3 \cdot h_3 = 0$$

$$h_0 + h_1 + h_2 + h_3 = \sqrt{2}$$

$$\text{Find}(h_0, h_1, h_2, h_3) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} & \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \\ \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} & \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \\ \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} & \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \\ \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} & \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \end{pmatrix}$$

Розв'язком цієї системи рівнянь є два вектори коефіцієнтів, які утворюють повну систему вейвлетів D^4 . Один з них наведено нижче (значення коефіцієнтів розраховані в середовищі MathCAD).

$$h_0 := \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \quad h_1 := \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} + \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6}$$

$$h_2 := \frac{3}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6} \quad h_3 := \frac{1}{8} \cdot \sqrt{2} - \frac{1}{8} \cdot \sqrt{6}$$

$$h_0 = 0.482962913145 \quad h_1 = 0.836516303738$$

$$h_2 = 0.224143868042 \quad h_3 = -0.129409522551$$

Графіки масштабної функції і вейвлету D^4 показані на рис. 1.

Вектори коефіцієнтів більшої довжини для вейвлетів Добеші можна отримати аналогічними методами, але це питання виходить за межі цієї роботи.

Розглянемо тепер алгоритм ДВП, який повинен перетворити дискретний вектор вхідного сигналу $f(n)$ в матрицю вейвлет-коефіцієнтів (МВК).

Спочатку формується перший рядок матриці проміжних розрахунків $[a_{j,n}]$:

$$a(0,n) = f(n). \quad (15)$$

На наступних кроках алгоритму по чергово формуються наступні рядки матриці проміжних розрахунків $[a_{j,n}]$ та матриці вейвлет-коефіцієнтів $[d_{j,n}]$:

$$a(j,n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) a(j-1, 2n+k), \quad (16)$$

$$d(j,n) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k) a(j-1, 2n+k). \quad (17)$$

Очевидно, що кожен наступний рядок цих матриць удвічі коротший за попередній, тобто довжини рядків є членами геометричної прогресії, показником якої є коефіцієнт стиснення.

Враховуючи те, що в останньому рядку має залишитися один елемент, довжина вхідного вектору сигналу повинна дорівнювати 2^M , де M – натуральне число. В цьому випадку результатом виконання ДВП буде матриця вейвлет коефіцієнтів розміром $2^{M-2} \times (M-1)$.

Вищенаведена математична модель була покладена в основу алгоритму та програми дослідження вібросигналів гідроагрегатів.

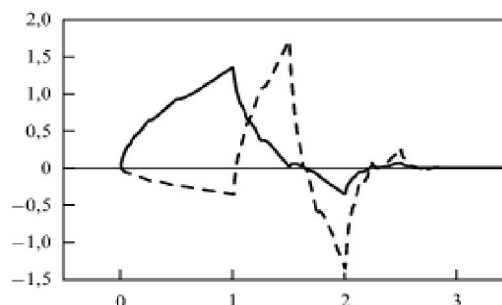


Рис. 1. Графік масштабної функції (суцільна лінія) та вейвлету D^4 (штрихова лінія)

Алгоритм ДВП з коефіцієнтом стискання 2 та його програмна реалізація

Масиви вхідних віброакустичних сигналів отримані від системи автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів (САДП-РДГ) [8].

Вимірювальні канали САДП-РДГ мають такі особливості:

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 стеку неприпустимо використовувати дані іншого. Тому, максимальна довжина вектору даних, яка може задаватись в програмі не повинна перевищувати 32768, що відповідає 2^{15} . Таким чином, максимальний розмір МВК може дорівнювати $2^{13} \times 14 = 8192 \times 14$.

2. До кожного показання вібросенсору апаратура вимірювального каналу додає деяку сталу величину, яку при обробці сигналу необхідно усунути.

Блок-схема алгоритму ДВП, побудована згідно з вищенаведеною математичною моделлю і з урахуванням особливостей вимірювальних каналів САДП-РДГ, показана на рис.2.

За цим алгоритмом була розроблена програма для попереднього дослідження віброакустичних сигналів, які були отримані від вібросенсорів гідроагрегату.

Розроблена програма (як це показано на рис. 3) передбачає:

- вибір файлу материнського вейвлету, в якому міститься вектор $h(N)$, в прикладі на рис. 3 вибраний файл **wave1.txt** з вейвлетом Добеші;
- введення файлу з даними вібросигналу (на рис. 3 – **9_1.txt**);
- вибір у файлі з даними вібросигналу номеру першого елементу і довжини вектору вхідних даних (на рис. 3 вектор починається з першого елемента файлу **9_1.txt** і має довжину 16384, яка дорівнює 2^{14}).

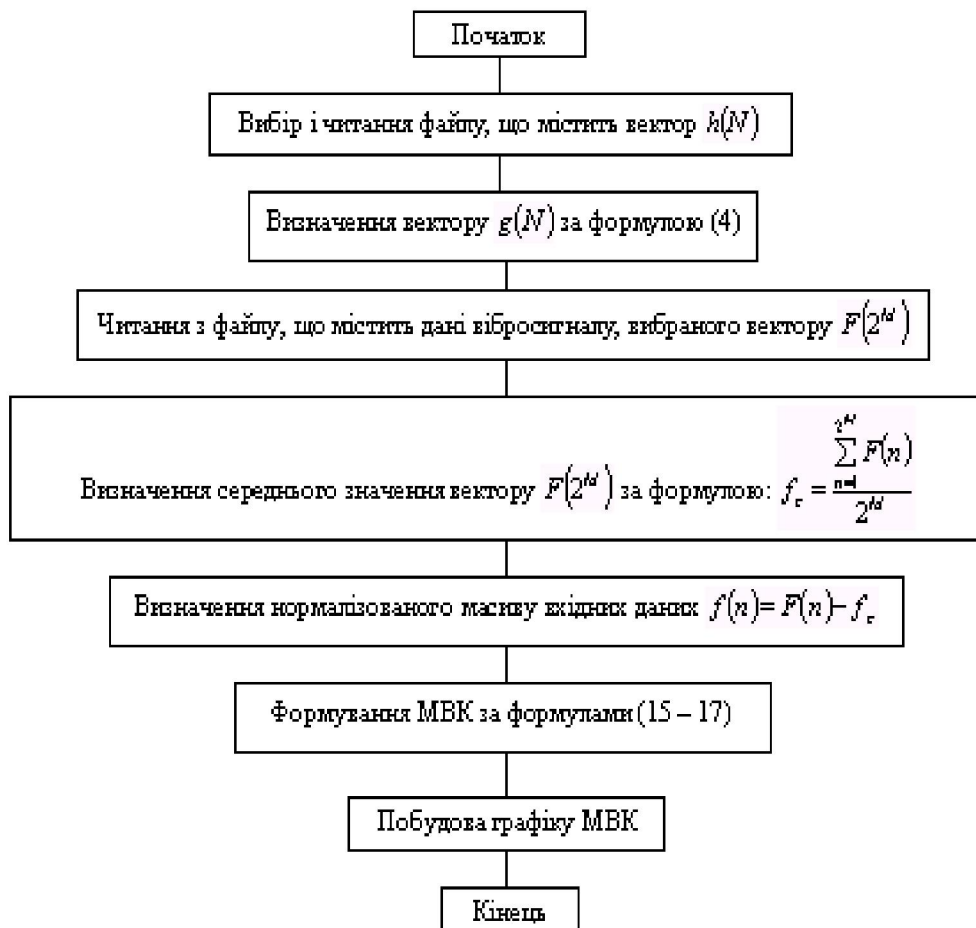


Рис. 2. Блок-схема алгоритму ДВП з коефіцієнтом стискання 2

Після проведення дискретного вейвлет-перетворення у вікні (рис. 4) з'являються такі дані:

- середнє значення вектору вхідних даних (на рис. 4 це 32.744776);
- вектор коефіцієнтів масштабної функції h ;
- вектор коефіцієнтів материнського вейвлету g ;
- трикутна матриця вейвлет-коефіцієнтів D .

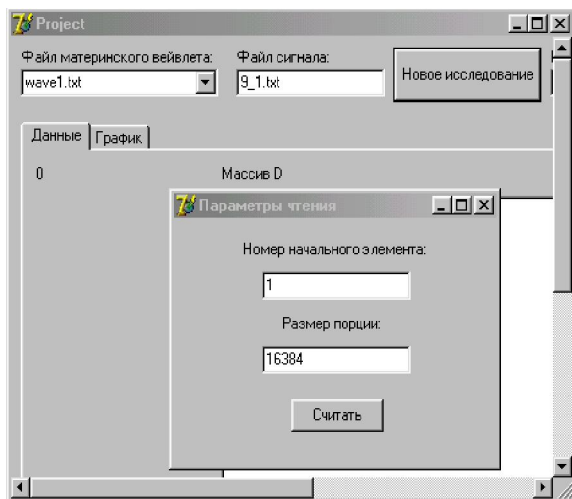


Рис. 3. Інтерфейс програми ДВП з коефіцієнтом стиснення 2

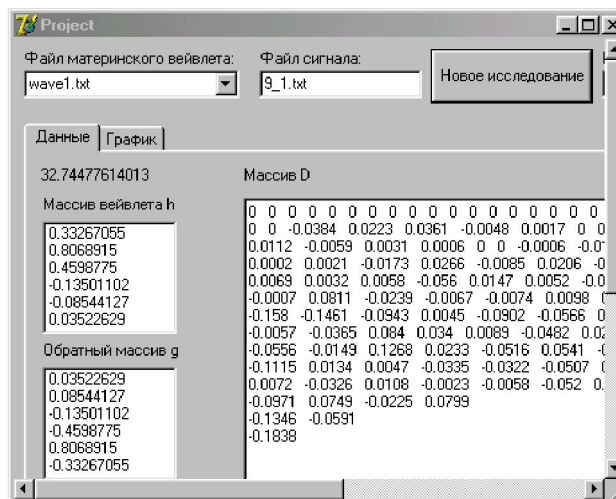


Рис. 4. Результати розрахунку матриці вейвлет-коефіцієнтів

Після визначення МВК програма надає можливість побудувати і переглянути графіки, для чого на вкладці **Графік** можна задати будь-яку кількість рядків МВК, для яких ми бажаємо побудувати графіки. Кожен рядок відповідає певному масштабному коефіцієнту ДВП. Крім того, є можливість вибрати для кожного рядка власний колір графіку.

За допомогою цієї програми був проведений аналіз певного обсягу вібросигналів гідроагрегату.

Аналіз вібросигналів гідроагрегату за допомогою програми ДВП

Для попереднього аналізу були вибрані архівні записи віброакустичних сигналів 3-го гідроагрегату Дністровської ГЕС-2 при працюючих інших гідроагрегатах.

Розглянемо тепер графіки МВК для різних часових інтервалів. Ці графіки є тривимірними, при цьому по вертикалі відкладаються значення МВК, по горизонталі – час, а в глибині графіка розташовані рядки МВК, що відповідають певним масштабним коефіцієнтам. Відзначимо, що найменші масштабні коефіцієнти (тобто смуги високих частот) розташовані в глибині графіка.

На графіку (рис. 5) показані окремі рядки МВК, які відносяться до малих, середніх та великих масштабних коефіцієнтів при зупиненому гідроагрегаті. Віброакустичний сигнал в цей час є фоновим, тобто викликаним вібрацією інших працюючих агрегатів.

Неважко помітити, що в рядках, які відносяться до малих масштабних коефіцієнтів (тобто

в смузі високих частот) мають місце досить різкі коливання значень вейвлет-коефіцієнтів навіть протягом дуже малих інтервалів часу. Це пояснюється високочастотними шумовими компонентами спектру, які мають випадковий характер і викликані різними чинниками (наприклад, кавітацією, вихроутворенням, дефектами підшипників тощо).

В смузі середніх присутні незначні зміни вейвлет-коефіцієнтів, а на низьких частотах вейвлет-коефіцієнти є більш стабільними.

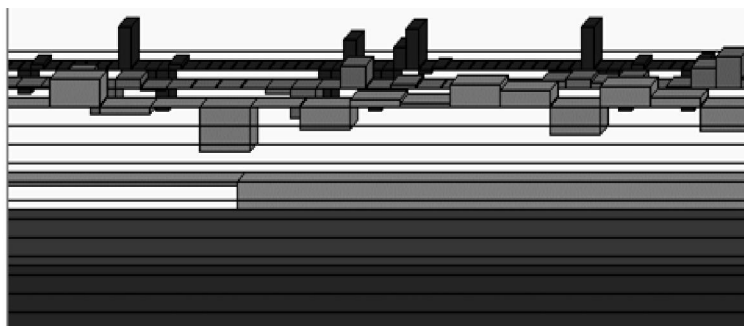


Рис.5. Графік МВК при зупиненому гідроагрегаті

Інша ситуація має місце при працюючому гідроагрегаті (рис.6, 7).

Розрахунки МВК за даними двох різних інтервалів часу показують значне зростання вейвлет-коефіцієнтів як на середніх, так і на низьких частотах. При цьому ці коефіцієнти досить часто різко змінюються, що підкреслює суттєву нестационарність віброакустичного сигналу.

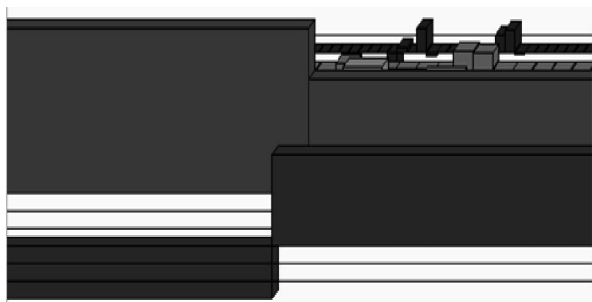


Рис. 6. Графік МВК при працюючому гідроагрегаті

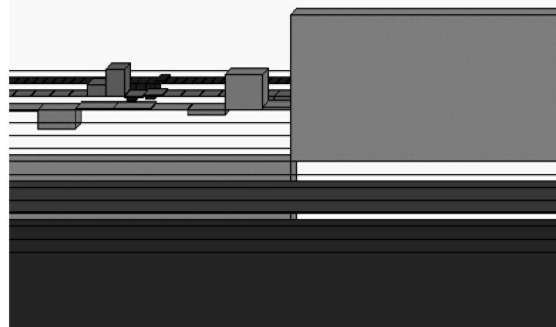


Рис. 7. Графік МВК при працюючому гідроагрегаті

Висновки

1. Визначення матриці вейвлет коефіцієнтів за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стиснення 2 продемонструвало суттєву нестационарність віброакустичного сигналу в усіх смугах частот і доцільність використання вейвлет-перетворень для діагностування вібраційних процесів.

2. Представляється доцільним дослідним шляхом проаналізувати результати дискретного вейвлет-перетворення віброакустичного сигналу для різних материнських вейвлетів та різних коефіцієнтів стиснення.

Список літературних джерел

1. Ширман А.Р. Практическая вибродіагностика и мониторинг состояния механического оборудования / Ширман А.Р., Соловьев А.Б. – Москва, 1996. – 276 с.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Добеши И. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. – 464 с.
3. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / Малла С.; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил. – ISBN 5-03-003691-1
4. К. Блаттер. Вэйвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер. – Москва, 2004. – 280 с. – ISBN 5-94836-033-4
5. И.М. Дремин. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи Физических Наук. – 2001. – Том 171, №5. – С. 465-501.
6. Кухарчук В.В. Застосування вейвлет-перетворень в задачах моніторингу та вибродіагностування машин та обладнання / Кухарчук В.В., Каців С.Ш. // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm>
7. Кухарчук В.В. Частотно-часовий аналіз вібросигналів з використанням вейвлет-перетворень / Кухарчук В.В., Каців С.Ш. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №1 (17). – С.50-54.
8. Кухарчук В.В. Система автоматизованого діагностування та прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів / Кухарчук В.В., Каців С.Ш., Говор І.К., Ніколаєв В.Я., Маліцький В.Л. // Вісник Інженерної Академії України. – 2009. – №2. – с. 126-131.