

С. Ш. Каців, к. т. н., доцент

ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ ГІДРОАГРЕГАТУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

У роботі запропоновано структуру та математичну модель штучної нейронної мережі, яка призначена для автоматизованого прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата. Розглянуто деякі попередні діагностичні висновки.

Ключові слова: прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата, штучна нейронна мережа, амплітудно-частотно-часовий спектр.

Вступ

Гідроагрегат є дуже складною динамічною гідроелектромеханічною системою, і математичний опис залежності віброакустичного сигналу від усіх чинників, які викликають вібрацію, практично неможливий.

Тому прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата здійснюється за допомогою штучної нейронної мережі (ШНМ), яка є важливим складником підсистеми діагностування й прогнозування системи автоматизованого діагностування й прогнозування розвитку дефектів гідроагрегатів (САДП-РДГ) [1].

Підсистема діагностування й прогнозування розвитку дефектів САДП-РДГ містить дві різні нейронні мережі: ШНМ діагностування наявних дефектів і ШНМ прогнозування розвитку дефектів. У цій роботі буде детально розглянуто ШНМ прогнозування, дано коротку характеристику ШНМ діагностування, а також розглянуто функціональні зв'язки між обома ШНМ.

Вхідною інформацією, необхідною для функціонування підсистеми діагностування й прогнозування розвитку дефектів САДП-РДГ, є:

1. Усі значення віброзміщення, що перевищують припустиму норму, за кожним із 4 вібросенсорів (ВД1 – ВД4) за певний інтервал часу з часовою фіксацією цих значень. Ці дані надходять до підсистеми діагностування й прогнозування від підсистеми поточного моніторингу, яка отримує її від вібросенсорів.

2. Амплітудно-частотно-часові спектри (АЧЧС), що відповідають кожному з вищезгаданих віброакустичних сигналів за цей же інтервал часу, які формуються програмою дискретного вейвлет-перетворення (ДВП). Ця програма входить до складу підсистеми діагностування й прогнозування [2 – 4].

3. Значення струму навантаження гідрогенератора за цей же інтервал часу з часовою фіксацією, які надходять від сенсора струму.

4. Значення рівня води у водосховищі за цей же інтервал часу з часовою фіксацією, які надходять від сенсора рівня.

Вихідні діагностичні висновки повинні відповідати основним чинникам [5], що викликають вібрацію гідроагрегата, а саме: невірноваженості ротора; порушенню жорсткості опорної системи; дефектам турбінного й опорно-упорного підшипників; вібрації електричних машин електромагнітного походження; порушенню гідродинаміки потоку.

Найпоширенішими типами ШНМ, що використовуються під час моделювання складних технічних систем, є мережі Кохонена, персептрони, імовірнісні та нечіткі ШНМ, нейронні мережі адаптивної резонансної теорії (ШНМ АРТ) тощо [6, 7].

Разом із тим, неоднорідність вхідних масивів даних, складність задачі, значна невизначеність експертних оцінок призводять до недоцільності використання стандартних типів ШНМ і потребують розробки неоднорідних нестандартних нейронних мереж.

ШНМ діагностування наявних дефектів фіксує наявність надмірних віброзміщень у віброакустичних сигналах і аналізують перерізи АЧЧС, які відповідають моментам часу, коли фіксуються надмірні віброзміщення. На основі аналізу цих перерізів роблять діагностичні висновки.

Для більш коректного аналізу цих перерізів зазначена ШНМ спочатку проводить виділення з АЧЧС параметрів, які не пов'язані безпосередньо з власними дефектами гідроагрегата, а саме:

- фонових значень вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот за умови, що не працює гідроагрегат;
- залежності вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот від струму навантаження гідроагрегата;
- залежності вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот від рівня води у водосховищі.

Відомо, що рівень турбулентності обернено пропорційний рівню води у водосховищі, тобто ця залежність має гіперболічний характер. Крім того, є вагомі підстави вважати, що вона має нелінійний характер. Що ж стосується залежності рівня вібрації від струму навантаження, то вона має прямо пропорційний характер і в першому наближенні її можна вважати лінійною.

Звичайно, у процесі дослідної експлуатації САДП-РДГ характер цих залежностей може уточнюватися, але, апріорі, можна записати

$$|d_j(H, I)| = D_{0j} + D_j + v_j I + \frac{1}{p_j + q_j H^2}, \quad (1)$$

де H – рівень води у водосховищі; I – струм навантаження гідрогенератора; $d_j(H, I)$ – функція залежності вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот від рівня води у водосховищі та струму навантаження; D_{0j} – усереднене значення масиву вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот за умови, що не працює третій гідроагрегат (фонове значення); D_j – усереднене значення масиву вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот при максимальному рівні води у водосховищі та режимі холостого ходу гідрогенератора; v_j – узагальнений числовий коефіцієнт, що характеризує залежність вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот від струму навантаження; p_j, q_j – узагальнені числові коефіцієнти, що характеризують залежність вейвлет-коефіцієнтів j -ої смуги частот від рівня води у водосховищі.

Ця залежність визначається лише для тих смуг частот, для яких вейвлет-коефіцієнти зростають під час падіння рівня води чи під час зростання струму навантаження. Для тих смуг частот, вейвлет-коефіцієнти яких ніяк не реагують ні на рівень води, ні на струм, з АЧЧС виділяється лише D_{0j} .

Отже, на вхід ШНМ прогнозування розвитку дефектів надходять АЧЧС усіх вібросигналів від програми ДВП і параметри $H, I, D_{0j}, D_j, v_j, p_j, q_j$ від ШНМ діагностування наявних дефектів.

Загальна структура ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата

Структура ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата передбачена двошарова й зображена на рис. 1.

Кількість вхідних нейронів у цій ШНМ дорівнює $4M + 1$.

Перший шар ШНМ містить $4M$ нейронів. Кожен з них отримує вейвлет-коефіцієнти

певної смуги частот від відповідного вхідного нейрона і відповідні параметри H , I , D_{0j} , D_j , v_j , p_j , q_j від ШНМ діагностування наявних дефектів.

Нейрони першого шару призначені для формування трендів кожної смуги частот АЧЧС кожного з чотирьох вібросигналів. Для побудови тренду з кожного рядка АЧЧС, який відповідає окремому стеку даних і півхвилинному інтервалу часу, вибирається максимальне (за абсолютною величиною) значення вейвлет-коефіцієнта.

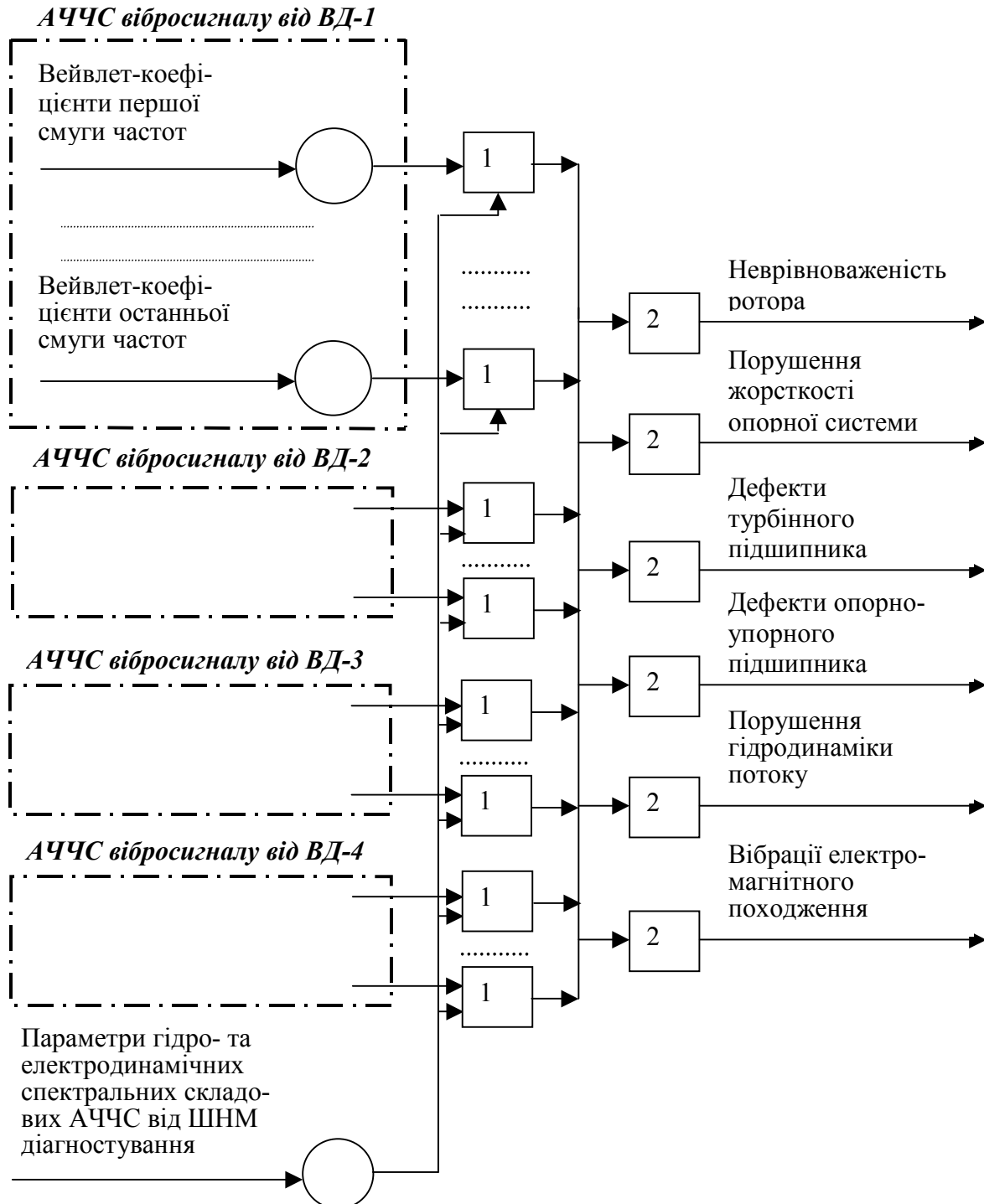


Рис. 1. Структура ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата

Далі цей тренд протягом відносно значного проміжку часу (наприклад, доби, але розмір цього проміжку необхідно уточнити під час дослідної експлуатації САДП-РДГ) аналізують. Якщо в результаті аналізу спостерігають впевнене зростання максимального значення

вейвлет-коефіцієнтів деяких смуг частот АЧЧС, то ці тренди передають на вхід нейронів другого шару ШНМ разом з параметрами H , I , D_{0j} , D_j , v_j , p_j , q_j відповідних смуг частот.

Другий шар ШНМ містить 6 нейронів, кожен з яких відповідає одному з чинників, які є причинами виникнення вібрацій.

Кожний нейрон другого шару отримує всі зростаючі тренди смуг частот, а також дані про можливу залежність цих смуг відповідної АЧЧС від гідродинамічних та електродинамічних чинників і фонові спектральні характеристики.

Кожен нейрон другого шару визначає рівень імовірності того, що причиною зростання вейвлет-коефіцієнтів є характерний чинник вібрації, якій відповідає цьому нейрону.

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

Математична модель, алгоритм і програмна реалізація ШНМ для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата

Як вже було сказано вище, призначенням нейронів першого шару є побудова трендів вейвлет-коефіцієнтів кожної смуги частот АЧЧС кожного з чотирьох вібросигналів за певні проміжки часу. Кожен тренд T_{ij} є числовою множиною, тобто можна записати

$$\forall i = 1, 4 \forall j = 1, M \forall r = 1, N \left(T_{ij} = \left\{ |d_{ij1}^{max}|, |d_{ij2}^{max}|, \dots, |d_{ijr}^{max}|, \dots, |d_{ijN}^{max}| \right\} \right), \quad (2)$$

де N – кількість стеків вхідних даних об'ємом 32768 значень, отриманих від вібросенсорів за заданий проміжок часу; $|d_{ijr}^{max}|$ – максимальне абсолютне значення вейвлет-коефіцієнта j -ої смуги частот АЧЧС i -го вібросигналу, що відповідає r -му стеку вхідних даних.

Далі виконують аналіз кожного тренду з метою виявлення стабільного зростання абсолютних максимальних значень вейвлет-коефіцієнтів.

Критерій оцінки такого зростання протягом дослідної експлуатації САДП-РДГ може уточнюватись, але, апріорі, прийнятий таким:

$$\frac{\sum_{r=1}^N |d_{ijr}^{max}|}{N} - \frac{\sum_{r=1}^{\frac{N}{2}} |d_{ijr}^{max}|}{\frac{N}{2}} > \varepsilon, \quad (3)$$

де ε – параметр, який характеризує степінь зростання тренду.

Значення ε має уточнюватись у процесі дослідної експлуатації САДП-РДГ, а спочатку його можна прийняти таким, що дорівнює 10% середнього значення вейвлет-коефіцієнтів тренду, тобто

$$\varepsilon = 0.1 \cdot \frac{\sum_{r=1}^N |d_{ijr}^{max}|}{N}, \quad (4)$$

Після проведення аналізу всі тренди T_{ij} зі стабільним зростанням вейвлет-коефіцієнтів (і лише вони) разом із параметрами H , I , D_{0j} , D_j , v_j , p_j , q_j надходять до другого шару ШНМ. Позначимо ці тренди T_{ij}^{\uparrow} .

Кожен нейрон другого шару ШНМ повинен виконувати такі процедури:

1. Спочатку визначається множина Z , яка містить останні елементи кожного зростаючого тренду

$$\forall |d_{ijN}^{max}| \in T_{ij} \uparrow \left(|d_{ijN}^{max}| \in Z \right). \quad (5)$$

2. Далі для кожного елемента множини Z слід відокремити фоновий, гідродинамічний та електродинамічний спектральні складники від складників, які спричинені іншими чинниками, а саме:

– для перших чотирьох нейронів, які характеризують безпосередньо механічні дефекти гідроагрегата; це виконують за формулою

$$\forall k = 1, 4 \forall |d_{ijN}^{max}| \in Z \left(d_{kij}^* = |d_{ijN}^{max}| - D_{0ij} - v_j I - \frac{1}{p_{ij} + q_{ij} H^2} \right); \quad (6)$$

– для п'ятого нейрона, який повинен діагностувати порушення гідродинаміки потоку, можна записати

$$\forall |d_{ijN}^{max}| \in Z \left(d_{5ij}^* = \frac{1}{p_{ij} + q_{ij} H^2} \right); \quad (7)$$

– для шостого нейрона, який повинен діагностувати електродинамічний складник вібрації, можна записати

$$\forall |d_{ijN}^{max}| \in Z \left(d_{6ij}^* = v_j I \right). \quad (8)$$

3. Наступним кроком є нормування всіх елементів d_{kij}^* , яке виконують за формулою

$$\forall k = 1, 6 \forall |d_{ijN}^{max}| \in Z \left(d_{kij}^{norm} = \frac{d_{kij}^*}{\sum_{k,i,j} d_{kij}^*} \right). \quad (9)$$

4. Показник імовірності PV_k чинника, який відповідає k -му нейрону, визначається як

$$\forall k = 1, 6 \forall |d_{ijN}^{max}| \in Z \forall j \in Q_k \left(PV_k = \sum_{i,j} w_{ki} d_{kij}^{norm} \right). \quad (10)$$

Аналізуючи вищенаведені вирази, легко помітити, що абсолютні значення показників достовірності будуть незначними і це призведе до певних незручностей під час їхнього аналізу. Тому доцільно ввести відносний рівень достовірності RV_{kt} за формулою

$$RV_{kt} = \frac{PV_{kt}}{\max(PV_{1t}, PV_{2t}, PV_{3t}, PV_{4t}, PV_{5t}, PV_{6t})}. \quad (11)$$

Отже, результативний діагностичний висновок може бути сформульований як множина значень рівнів імовірності різних чинників вібрації $\{RV_1, RV_2, RV_3, RV_4, RV_5, RV_6\}$.

Розглянемо декілька прикладів, отриманих за допомогою програми, реалізованої за вищенаведеним алгоритмом.

На рис. 2 зображено тренд 7-ої смуги частот АЧС вібросигналу, отриманого від вібросенсора ВД1 (турбінний підшипник).

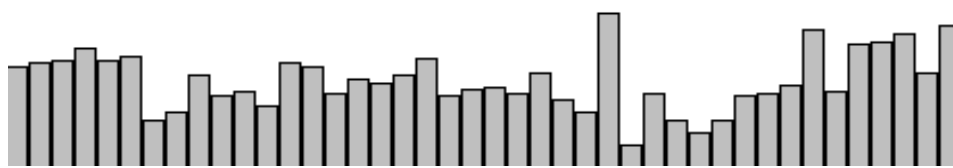


Рис. 2. Тренд 7-ої смуги частот АЧС вібросигналу, отриманого від вібросенсора ВД1

Навіть без використання критерію (3) видно, що цей тренд є практично незмінним і немає потреби передавати його на нейрони другого шару ШНМ.

Більш цікавим є тренд, зображений на рис. 3.

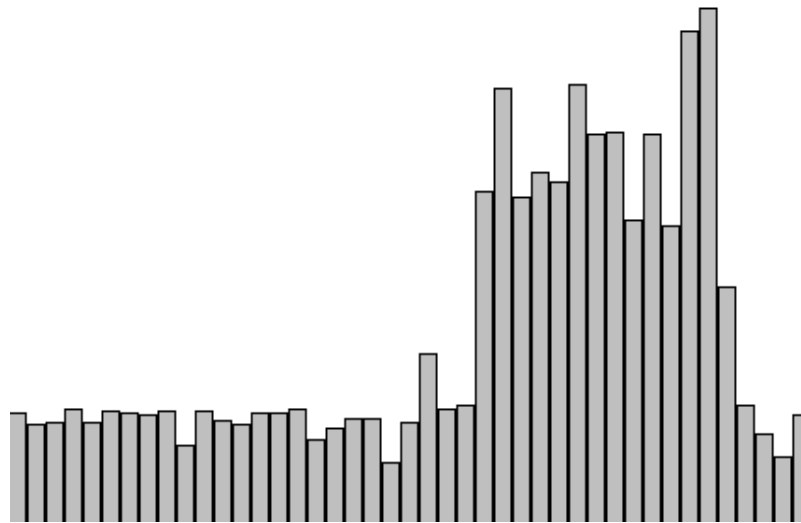


Рис. 3. Тренд 9-ої смуги частот АЧЧС вібросигналу, отриманого від вібросенсора ВД1

У цьому випадку доцільно передати цей тренд до другого шару нейронів і дослідити причини його зростання, оскільки воно, цілком можливо, може бути викликане тимчасовим падінням рівня води у водоймищі або зростанням струму навантаження гідрогенератора.

Аналогічна ситуація (навіть ще яскравіше виражена) спостерігається в тренді 10-ої смуги частот вібросигналу від ВД3 (рис. 4).

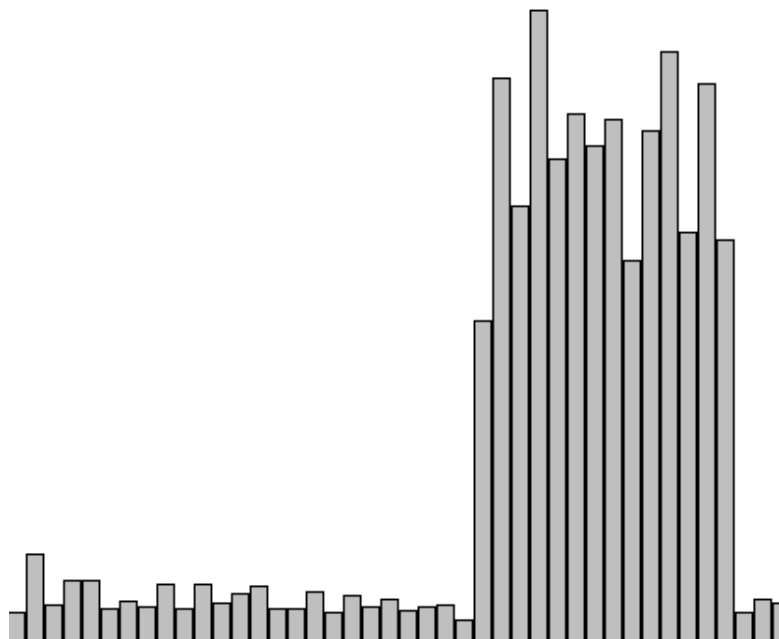


Рис. 4. Тренд 10-ої смуги частот АЧЧС вібросигналу, отриманого від вібросенсора ВД3

Висновки

1. Для прогнозування розвитку дефектів гідроагрегата запропоновано двошарову нестандартну неоднорідну ШНМ, основною входною інформацією для якої є АЧЧС віброакустичних сигналів гідроагрегата.

2. Виняткова складність гідроагрегата як динамічної гідроелектромеханічної системи зумовлює значну невизначеність апріорних експертних оцінок щодо залежності АЧЧС віброакустичних сигналів від чинників, які спричиняють вібрацію.

3. Тому процедури навчання та самонавчання ШНМ необхідно проводити протягом усього часу дослідної експлуатації САДП-РДГ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кухарчук В. В. Система автоматизованого діагностування і прогнозування розвитку дефектів гідрогенераторів / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, І. К. Говор, В. Я. Ніколаєв, В. Г. Мадьяров // Вісник Інженерної Академії України. – 2009. – № 2. – С. 126 – 132.
2. Кухарчук В. В. Аналіз вібросигналів гідроагрегату за допомогою дискретного вейвлет-перетворення з коефіцієнтом стисання 2 / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2011. – № 1. – С. 124 – 129.
3. Кухарчук В. В. Дослідження результатів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналу при коефіцієнті стисання 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.
4. Кухарчук В. В. Порівняльний аналіз результатів дискретного вейвлет-перетворення вібросигналів з довільними цілими коефіцієнтами стисання / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, І. К. Говор, С. О. Биковський // Вісник Інженерної Академії України. – 2011. – № 2. – С. 172 – 176.
5. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
7. Горбань А. Н. Нейронные сети на персональном компьютере. / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев. – Новосибирск: Наука, 1996. – 276 с.

Каців Самоїл Шулімович – к. т. н., доц., доцент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, тел. (0432) 598444, e-mail: kaciv@ineem.vntu.edu.ua.

Вінницький національний технічний університет.