

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Наукові праці**  
Донецького національного технічного  
університету

**Серія: “Інформатика, кібернетика  
та обчислювальна техніка”**

Всеукраїнський науковий збірник

Заснований у травні 1996 року

Виходить 2 рази на рік

*№ 1 (32) ’ 2021*

**Покровськ – 2021**

**УДК 004.3+004.9+004.2+51.7+519.6+519.7**

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 8 від 30.09. 2021).

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які є науковими партнерами ДонНТУ. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в таких напрямках, як інформатика, чисельні методи, паралельні обчислення, програмування, розробка засобів обчислювальної техніки, дослідження комп'ютерних мереж, машинна графіка і обробка зображень, математичне моделювання в різних галузях. Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

**Засновник та видавець** – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

***РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:***

Д-р техн. наук, проф. Є.О. Башков (головний редактор); д-р техн. наук, проф. О.А. Дмитрієва (заступник головного редактора); член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, проф. В.П. Боюн; д-р техн. наук, проф. О.О. Баркалов; д-р техн. наук, проф. О.В. Вовна; д-р техн. наук, проф. А.А. Зорі; д-р техн. наук, проф. С.Д. Погорілий; д-р техн. наук, проф. О.Н. Романюк; д-р техн. наук, проф. В.А. Святний; д-р техн. наук, проф. Тянев Дмитр Стоянов; д-р техн. наук, проф. Г.Г. Швачич; канд. техн. наук, доц. І.Я. Зеленцова; канд. техн. наук, доц. І.С. Лактіонов; канд. техн. наук, доц. Н.О. Маслова; канд. техн. наук, доц. І.А. Назарова (відп. секретар випуску).

**Адреса редакції:** 85300, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, ДВНЗ «ДонНТУ», 3.312.  
E-mail: [yevhen.bashkov@domntu.edu.ua](mailto:yevhen.bashkov@domntu.edu.ua)

Збірник зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ, №7374 від 03.06.2003.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії за спеціальностями 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія (наказ Міністерства освіти і науки України №409 від 17 березня 2020 р.)

Збірник "Наукові праці ДонНТУ, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка" за наказом № 409 МОНУ від 17. 03.2020 отримав категорію Б.

## ЗМІСТ

Самощенко О. В., Лапко В. В., Мірошкін О. М., Зеленцова І. Я., Маргієв Г. Е. Додавання та віднімання в L-системі кодування цілих чисел	4
Романюк О.Н., Дудник О.О., Снігур А.В., Рейда О.М., Романюк О.В. Особливості нормалізації векторів при перспективно-коректному відтворенні кольорів	11
Павловський Є. В. Огляд методів оцінки якості зображень	18
Дмитрієва О.А., Алтухова Т.В., Бабенко Є.О. Розробка комп'ютерної моделі системи діагностики технічного стану електрообладнання на основі кластерного аналізу	24
Граняк В. Ф., Каців С. Ш., Кухарчук В.В. Використання дискретного вейвлет аналізу вібро-акустичного сигналу для виявлення дебалансу ротора обертових електричних машин	32
Єгошина Г. А., Вороной С.М. Рекомендаційний модуль на основі обмежень для онлайн-сервісу ріелторського агентства	41
Ратов Д. В. Програмний контролер автоматизації формування документів з обмеженням несанкціонованого доступу	49
Пархоменко А.В., Туленков А.В., Залюбовський Я.І., Горіченко Ю.Є. Методи та засоби аналізу даних системи домашньої автоматизації	57

УДК 681.2

В.Ф. Граняк<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
С.Ш. Качив<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
В.В. Кухарчук<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна,  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна,  
Titanxp2000@ukr.net

## Використання дискретного вейвлет аналізу вібро-акустичного сигналу для виявлення дебалансу ротора обертових електричних машин

*В роботі запропоновано спосіб виявлення дебалансу ротора за допомогою дискретного вейвлет перетворення вібро-акустичного сигналу електричної машини. Встановлено частотні смуги, що доцільно аналізувати з метою виявлення зазначеного дефекту. Запропоновано числовий критерій оцінки впливу дебалансу ротора на коефіцієнти вейвлет-перетворення у вигляді середньо квадратичного значення вейвлет коефіцієнтів інформативних смуг частот при дослідженні часового інтервалу, що значно перевищує період обертання ротора електричної машини.*

**Ключові слова:** електрична машина, дебаланс ротора, дефект, сплеск, вейвлет-перетворення.

DOI: 10.31474/1996-1588-2021-1-32-32-40

### Вступ

На сьогоднішній день склалася стійка тенденція до побудови систем технічного контролю та діагностування силових електричних машин на основі аналізу їх вібро-акустичних характеристик. Це пов'язано як з їх високими чутливістю та інформативністю так і з можливістю вимірювання вказаного параметру безпосередньо у режимі роботи електричної машини без необхідності суттєвого втручання у її конструкцію [1, 2]. Про те здійснення такого аналізу пов'язане з необхідністю розв'язання ряду науково-прикладних задач, які впливають з особливостей вібро-акустичного сигналу, що виникає при роботі електричних машин. Зокрема у складі такого сигналу містяться як періодичні складові різної частоти так і аперіодичні (пікові) складові, обумовлені як наявністю дефектів різної природи так і іншими періодичними та аперіодичними збуджуючими силами [3, 4].

Серед існуючих достатньо описаних та вивчених підходів, придатних для аналізу часової реалізації вібросигналу, що може бути отриманий під час роботи реальної електричної машини, можна виділити перетворення Фур'є та дискретне вейвлет перетворення (ДВП). Про те варто відзначити, що перетворення Фур'є математично більш складне за дискретне вейвлет перетворення, а отже потребуватиме більшої кількості операцій для свого здійснення та не передбачає можливості дослідження локалізованих збурень взагалі [5], що робить його мало ефективним для використання у сучасних системах аналізу вібро-акустичних сигналів електричних машин. Тоді як ДВП, будучи у першу чергу адаптованим на виявлення саме локалізованих пікових збурень, не передбачає

наявності готових інструментів, призначених для сепарації періодичної та аперіодичної складових. Тож, враховуючи сказане, є очевидним, що розробка нових підходів до виявлення періодичних складових вібросигналу на основі ДВП, які можуть викликати ряд дефектів обертових електричних машин, є актуальною науково-прикладною задачею, вирішення якої дозволить суттєво підвищити ефективність роботи систем технічного моніторингу та діагностування.

### Постановка задачі

До найбільш поширених причин виникнення вібрації у обертових електричних машинах можна віднести: невірноваженість ротора, порушення співвісності валів, порушення жорсткості опорної системи, дефекти підшипників, вібрація електричних машин електромагнітного походження та порушення гідро і газодинаміки потоку (у випадках гідро- та турбоагрегатів). Особливістю вібросигналів, обумовлених невірноваженістю ротора є їх квазіперіодичний характер (рис. 1) [3, 4, 6].

Тож, при проведенні стандартного вейвлет-аналізу наявність таких складових вібрації не призводять до формування одиничного яскраво вираженого локального піку в певній частотній смузі, а, отже, за умови відносно невеликих значеннях дебалансу, буде мало помітною при аналізі сигналу, отриманого у результаті дискретного вейвлет перетворення. Тож, враховуючи той факт, що дебаланс ротора, як було зазначено раніше, входить до переліку найбільш поширених дефектів електричних машин, а особливості вібро-акустичного сигналу суттєво обмежують можливість застосування перетворення Фур'є, є очевидною необхідність

формулювання нових методів додаткової обробки сигналу на виході дискретного вейвлет перетворення з метою отримання

високоінформативних ознак, що вказували б на наявність зазначеного дефекту.

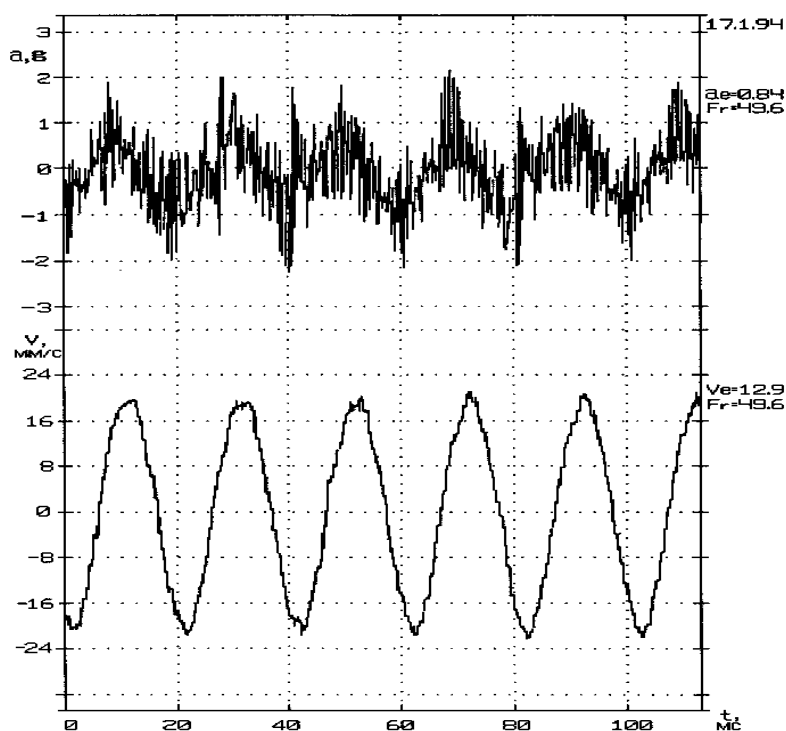


Рисунок 1 – Типові форми сигналів віброприскорення і віброшвидкості електродвигуна, що має нерівноваженість ротора

### Аналіз шляхів розв'язання задачі

Одна з головних ідей вейвлетного представлення сигналів на різних рівнях декомпозиції (розкладання) сигналу полягає в розділенні функцій наближення до сигналу на дві групи: що апроксимує – грубу, з достатньо повільною часовою динамікою змін, і що деталізує – з локальною і швидкою динамікою змін на тлі плавної динаміки, з подальшим їх дробленням і деталізацією на інших рівнях декомпозиції сигналів. Це можливо як в часовій, так і в частотній областях представлення сигналів вейвлетами. В цьому випадку базисна вейвлет функція дозволяє сконцентрувати увагу на тих або інших локальних особливостях аналізованих процесів. При чому, за своєю суттю деталізація неперервне вейвлет перетворення (НВП) є ні чим іншим, як визначенням функції взаємкореляції між материнською вейвлет-функцією та досліджуванним сигналом, що впливає з математичної моделі такого перетворення [5, 7]:

$$W(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a, \tau}^*(t) dt \quad (1)$$

де  $W(a, \tau)$  – функція деталізації (результат вейвлет перетворення);  $a$  – параметр масштабу;  $\tau$  – параметр зсуву;  $f(t)$  – функція, що аналізується;  $\psi_{a, \tau}^*(t)$  – комплексно спряжена вейвлет функція.

Враховуючи те, що обчислення при вейвлет перетворенні здійснюються шляхом зміни масштабу “вікна” аналізу, зсуву його в часі, множення на сигнал та інтегрування по всій осі часу [7, 8], то фізичний зміст такого перетворення можна представити як пошук ділянок аналізованої функції у часовій та частотній областях, що за своєю формою будуть корельованими з материнською вейвлет-функцією.

Аналогічний фізичний зміст зберігається і при ДВП, при здійсненні якого коефіцієнти деталізації можуть бути розраховані наступним чином [5, 8]:

$$d_k^j = \sum_{n \in \mathbb{Z}} g_{n-2k} \cdot c_n^{j+1}, \quad (2)$$

де  $d_k^j$  –  $k$ -й коефіцієнт деталізації  $j$ -ї частотної смуги;  $g$  – коефіцієнт материнської вейвлет функції;  $c^{j+1}$  – апроксимуючий коефіцієнт попередньої частотної смуги, розраховуються наступним чином:

$$c_k^j = \sum_{n \in Z} h_{n-2k} \cdot c_n^{j+1}, \quad (3)$$

де  $h$  – коефіцієнт масштабуючої функції;  
Для старшої частотної смуги у якості апроксимуючих коефіцієнтів використовується часова реалізація досліджуваного сигналу.

Враховуючи кореляційний принцип, закладений у логіку вейвлет перетворення, не важко дійти висновку, що значення коефіцієнтів окремо узятій частотній смугі будуть, у першу чергу, визначатися співпадінням форми аналізованої функції на досліджуваному масштабі (обраній частотній смугі) з формою базисної вейвлет функції. При цьому варто зазначити, що, оскільки, вейвлет перетворення у межах одного масштабу досліджує сигнал усієї часової реалізації з заданим кроком дискретизації  $\tau$  [8], то у випадку наявності періодичної складової у вібро-сигналі та виборі материнської вейвлет-функції, що буде максимально точно описувати поведінку цієї періодичної складової, варто очікувати серію симетричних додатних на від'ємних піків на усьому часовому діапазоні, протягом якого проводяться спостереження. При чому додатні піки спостерігатимуться у випадку синфазності шуканого коливання та материнського вейвлету, а від'ємні – при перебуванні останніх у протифазі.

В такому випадку задача реєстрації досліджуваного дефекту може бути розбита на дві підзадачі: підбір материнського вейвлету, який був би максимально наближений до обумовленої неврівноваженістю ротора складової вібро-сигналу та розробка критерію, який би давав змогу кількісно оцінити вплив зазначеного коливання на коефіцієнти вейвлет перетворення окремих частотних смуг та був максимально нечутливим до неінформативних сплесків, обумовлених збурюючими силами іншого походження.

Аналіз наведених у літературі описув вібро-акустичних сигналів, обумовлених

неврівноваженістю ротора, показує, що зазначений дефект призводить до появи коливань, які містять гармонічну складову, локалізовану на роторній частоті обертання, а також її другій та третій гармоніці. При чому, амплітуда коливань з переходом на другу та третю гармонічні складові різко зменшується [3, 4]. Зазначений факт обумовлює доцільність аналізу частотного діапазону, що включає у себе частоту обертання ротора, та, меншою мірою, частотні діапазони, які відповідають подвоєній та потроєній роторній частоті. А підбір материнського вейвлету доцільно здійснювати виходячи з ознак, властивих одиничному гармонічному коливанню.

До основних характеристик одиничного гармонічного коливання можна віднести симетрію відносно осі часу, при зміщенні додатної складової на половину періоду уздовж зазначеної осі в довільному напрямку та три нульових стани при розгляді кожного з періодів як незалежних піків, рознесених у часовій області. Не дивлячись на те, що на материнську вейвлет-функцію накладається відоме обмеження:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (4)$$

переважна більшість відомих вейвлетів являються асиметричними відносно осі часу. Крім цього усі вейвлети, 4-го та вищих порядків передбачають наявність розтягнутих у часовій області вторинних сплесків, що у випадку досліджуваних коливань означатиме накладання залишків одного сплеску на сусідні [9]. Враховуючи це, найбільш подібними до одиничного гармонічного коливання можна вважати вейвлет Хаара та вейвлет Добеши 4-го порядку. Про те варто відзначити, що кожен із них має у своїй структурі суттєві відмінності у порівнянні з одиничним гармонічним коливанням. Зовнішній вигляд зазначених вейвлетів наведений на рис. 2 [5, 8, 9].

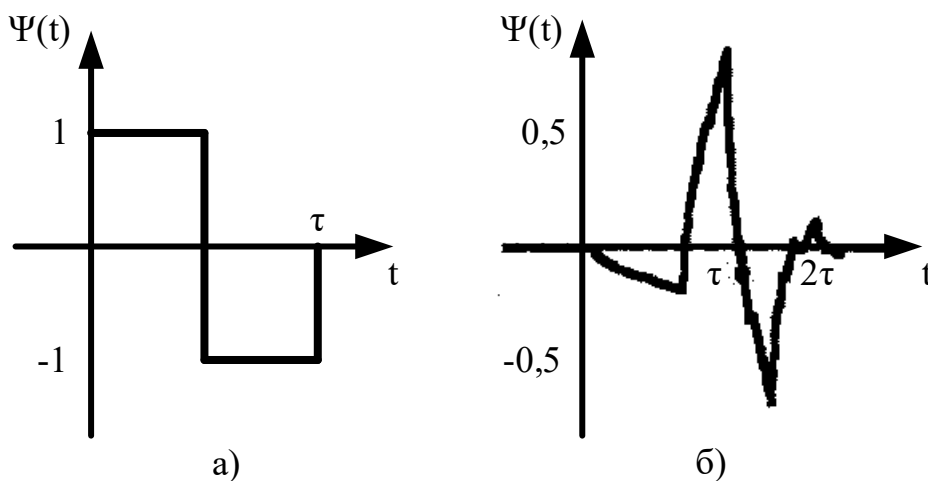


Рисунок 2 – Материнські вейвлет-функції: а) Хаара, б) Добеши 4-го порядку

Як впливає з рис. 2, вейвлет Хаара характеризується повною  $t$ -симетрією з трьома нульовими станами, про те має абсолютно вертикальні фронти, що є не характерним для гармонічного коливання. Тоді як вейвлет Добеши 4-го порядку характеризується суттєвою  $t$ -асиметрією при врахуванні вторинних сплесків, про те основний сплеск є майже симетричним та має більш плавні передній та задній фронти, що більшою мірою відповідають досліджуваному сигналові. Враховуючи зазначені обставини є очевидною доцільність експериментального встановлення більш ефективного з наведених вейвлетів, що характеризувався б кращою чутливістю відносно досліджуваного дефекту.

Другою задачею, що була сформульована у межах пошуку критерію виявлення дебалансу ротора є розробка числового критерію аналізу коефіцієнтів вейвлет перетворення. Враховуючи періодичність вібро-акустичного сигналу, обумовленого наявністю зазначеного дефекту, а також ту обставину, що кожне із гармонічних коливань представляється як окремий сплеск, варто очікувати періодичну зміну значень вейвлет коефіцієнтів у часовій області в межах смуг частот, що включають у себе роторну частоту, а також її другу та третю гармоніки. При чому амплітуди таких періодичних змін будуть напряму пов'язані з ступенем розвитку дефекту. Тож, при виконанні наступної нерівності:

$$t_{cn} \gg T_p, \quad (5)$$

де  $t_{cn}$  – тривалість часової реалізації досліджуваного сигналу;  $T_p$  – період обертання ротора електричної машини. доцільним є застосування інтегрального підходу до аналізу коефіцієнтів вейвлет перетворення. Відтак, у якості шуканого критерію може бути використано середньо-квадратичне значення вейвлет коефіцієнтів досліджуваних частотних смуг у межах часового інтервалу, тривалість якого

значно більша за період обертання ротора. Такий підхід дозволить врахувати наявність як додатних так і від'ємних максимумів вейвлет коефіцієнтів у межах досліджуваного часового інтервалу, а також характеризуватиметься пониженою чутливістю до неінформативних збурень, обумовлених аперіодичними збурюючими діями, що можуть виникати в процесі експлуатації електричної машини. Виходячи з сказаного, математично числовий критерій оцінки впливу дебалансу ротора на коефіцієнти вейвлет-перетворення зазначених частотних смуг може бути представлений наступним чином:

$$k_{деб} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \text{ при умові } t_{cn} \gg T_p, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість коефіцієнтів вейвлет перетворення досліджуваної частотної смуги;  $d_i$  –  $i$ -й коефіцієнт вейвлет перетворення досліджуваної частотної смуги.

З метою підтвердження неведених вище теоретичних міркувань було проведено експериментальне дослідження з використанням електричної машини в режимі холостого ходу з моментом інерції ротора –  $0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , частотою обертання в режимі холостого ходу –  $720 \text{ об/хв}$  ( $12 \text{ Гц}$ ) та додатковим внесеного дебалансу  $0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}$ . Ємнісний мікромеханічний акселерометр було закріплено на корпусі електричної машини таким чином, щоб вимірювальні осі сенсора були строго перпендикулярними до осі ротора, вісь  $X$  – напрямлена строго вертикально, вісь  $Y$  – строго горизонтально. Частота дискретизації сигналу становила  $232 \text{ Гц}$ , довжина часової реалізації досліджуваного сигналу –  $2^{14}$  значень.

При перетворенні отриманого сигналу віброприскорення за допомогою вейвлета Хаара та подальшого розрахунку середньо-квадратичного вейвлет коефіцієнтів для кожної із частотних смуг з та без використання дебалансу було отримано наступні результати, наведені на рис. 3 - рис. 6.

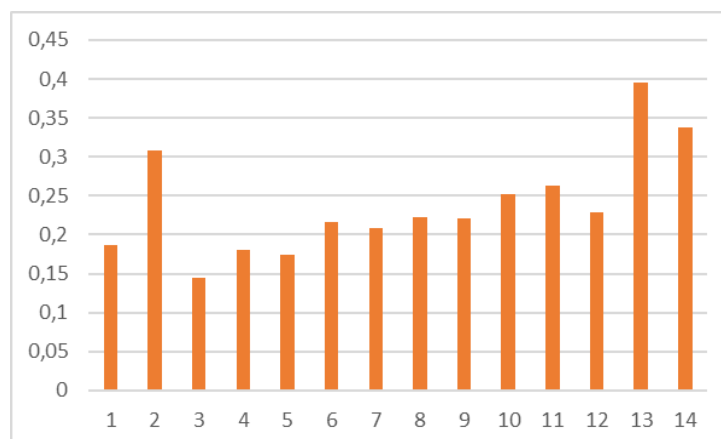


Рисунок 3 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Хаара для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі  $X$  без використання дебалансу

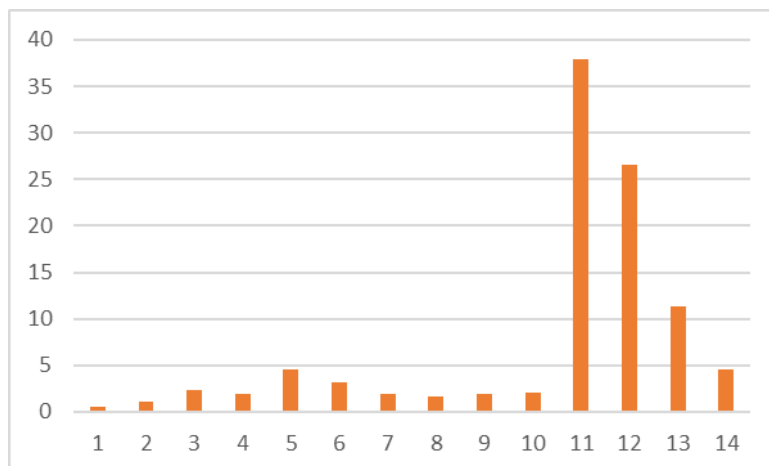


Рисунок 4 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Хаара для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі X з використанням дебалансу

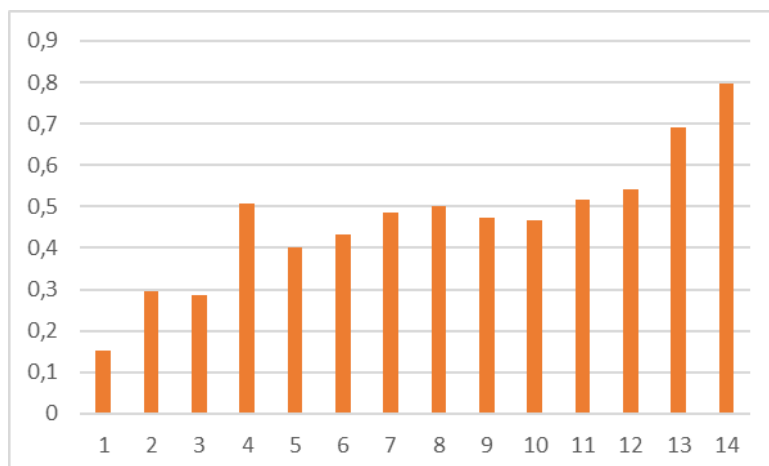


Рисунок 5 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Хаара для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі Y без використання дебалансу

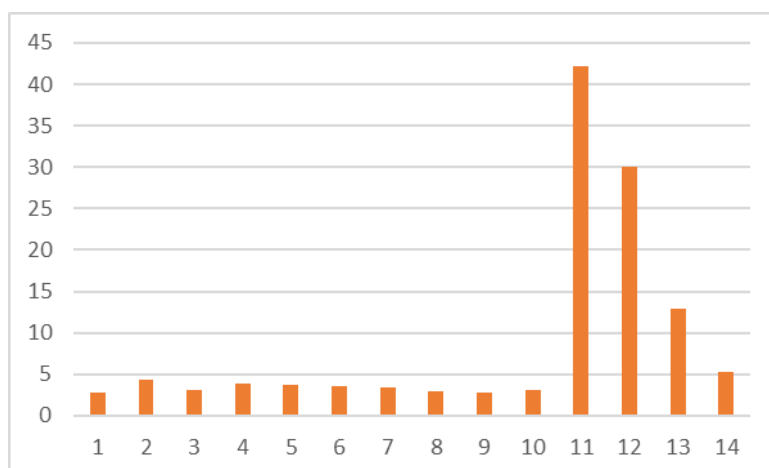


Рисунок 6 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Хаара для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі Y з використанням дебалансу

Також було виконано аналогічне перетворення за допомогою вейвлета Добеши 4-го

порядку. Результати розрахунку наведені на рис. 7 – рис. 10.



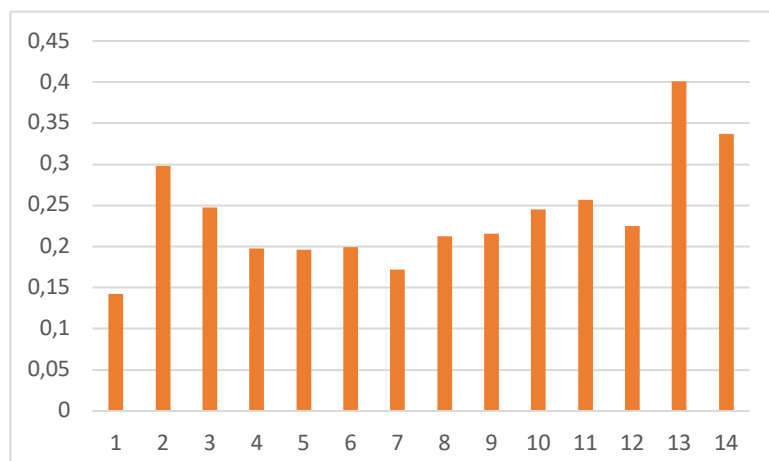


Рисунок 7 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі X без використання дебалансу

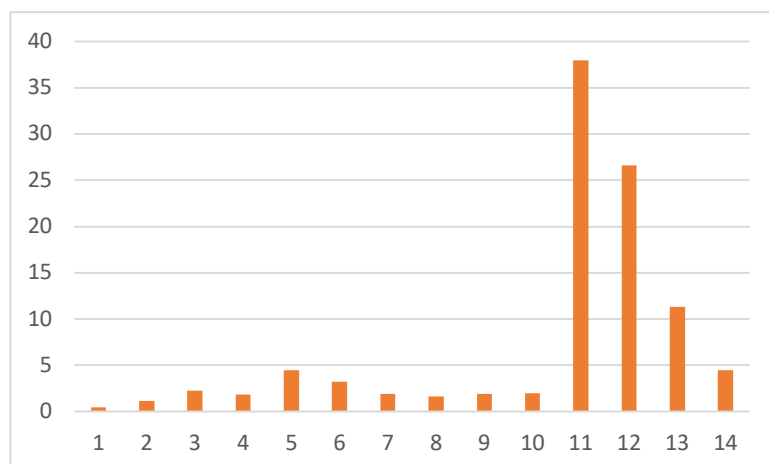


Рисунок 8 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі X з використання дебалансу

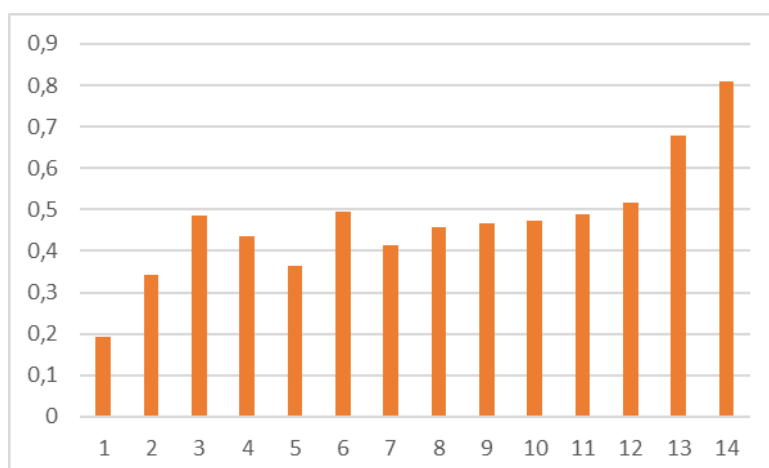


Рисунок 9 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі Y без використання дебалансу

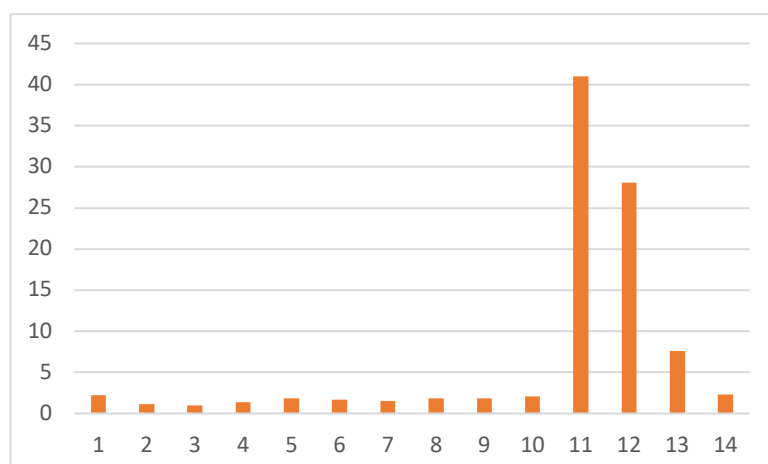


Рисунок 10 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі Y з використання дебалансу

Як випливає з аналізу залежностей, наведених на рис. 3 – рис. 10, найбільш інформативними для виявлення дебалансу ротора, як і очікувалося, є смуги частот, що відповідають частоті обертання ротора електричної машини та її другої та третьої гармоніки (відповідно 11, 12 та 13 частотні смуги). Порівняння ж результатів, отриманих при розкладанні сигналу на основі вейвлету Хаара та вейвлету Добеши 4-го порядку показали, що обидва вейвлета характеризуються приблизно однаковою достатньо високою чутливістю до наявності досліджуваного дефекту. Тож, враховуючи той факт, що перетворення на основі материнської вейвлет-функції Хаара є математично більш простим (потребує меншої

кількості математичних операцій) [5, 8, 9], можна зробити висновок, що використання саме останнього є більш ефективним для виявлення зазначеного дефекту.

З метою встановлення впливу асиметричності відносно осі часу материнської вейвлет-функції на інформативність запропонованого числового критерію проведено оцінку впливу дебалансу ротора на середньо квадратичне значення вейвлет коефіцієнтів при використанні у якості материнської вейвлет-функції вейвлету Добеши 6-го порядку, що має суттєво більшу t-асиметрію. Результати розрахунку наведені на рис. 11 та рис. 12 відповідно.

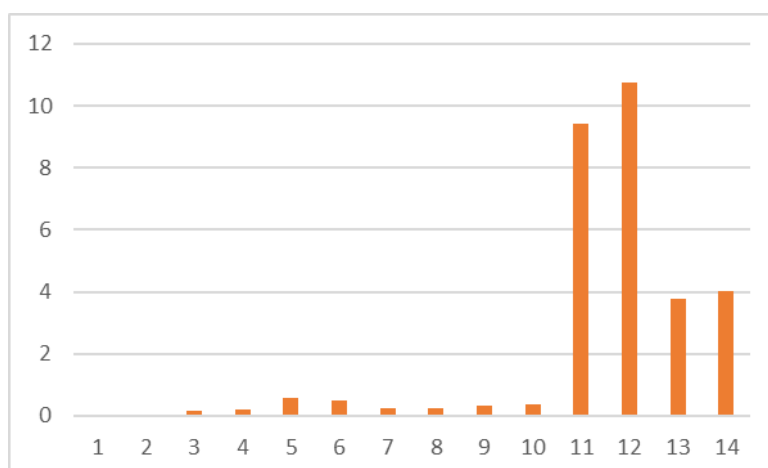


Рисунок 11 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі X з використання дебалансу

Аналізуючи залежності, наведених на рис. 11 та рис. 12, можна констатувати різке зменшення чутливості запропонованого числового критерію до досліджуваного дефекту, а, також, зміщення максимуму даного числового критерію з роторної смуги частот, що підтверджує зроблені раніше теоретичні висновки про вибір оптимальних материнських вейвлет-функцій.

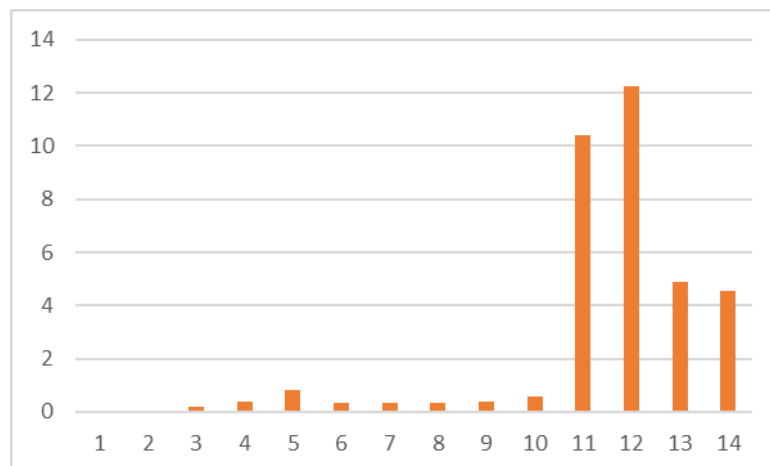


Рисунок 12 – Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу по осі Y з використання дебалансу

### Висновки

1. Встановлено, що виявлення дебалансу ротора з використанням вейвлет-перетворення часової реалізації вібро-акустичного сигналу доцільно здійснювати за використанням материнської вейвлет-функції Хаара, що забезпечує поєднання високого ступеня спорідненості материнського вейвлету з формою зміни вібросигналу за рахунок внесеного дебалансу та відносної простоти такого перетворення.

2. Показано, що при виявленні дебалансу ротора доцільно здійснювати аналіз поведінки вейвлет коефіцієнтів частотних смуг, що включають у себе роторну частоту та її другу та

третю гармоніки. Оскільки вплив зазначеного дефекту на інші частотні смуги буде мінімальним, то аналіз поведінки їх коефіцієнтів вейвлет перетворення з метою виявлення зазначеного дефекту є неефективним.

3. Запропоновано числовий критерій оцінки впливу дебалансу ротора на коефіцієнти вейвлет-перетворення у вигляді середньо квадратичного значення вейвлет коефіцієнтів інформативних смуг частот при дослідженні часового інтервалу, що значно перевищує період обертання ротора електричної машини. Показано, що зазначений критерій має понижено чутливість до впливу неінформативних одиничних збурень, які можуть виникати в процесі роботи електричної машини.

### Список літератури

1. Левицький А. С. Підвищення ефективності діагностування потужних гідроагрегатів за рахунок застосування ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. Гідроенергетика України, 2010, № 4. С. 10-13.
2. Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machine / V. F. Hraniak, V. V. Kukharchuk, V. Y. Kucheruk and other. Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. No 1, 2018. P. 72-80
3. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродіагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Машиностроение. Москва, 1996. 276 с.
4. Дискретні вейвлет-перетворення в діагностуванні гідроагрегатів. Монографія / В. В. Кухарчук, С. Ш. Качив, В. Ф. Граняк та ін. Вінниця: ВНТУ, 2018. 112 с.
5. Воробьев В. И., Грибунин В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования. Санкт-Петербург: ВСУ, 1999. 204 с.
6. Киселев Ю. В., Киселев Д. Ю., Тиц С. Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники: учебник. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2012. 207 с.
7. Broughton S. A., Bryan K. Discrete fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 355 p.
8. Polikar R. The Wavelet tutorial. Roma: Rowan University, College of Engineering Web Servers, 2001. 79 p.
9. Addison P. S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance – Edinburgh: Napier University, 2002. 359 p.

---

---

**References**

1. Levitsky A. S. (2010) *Improving the efficiency of diagnosing powerful hydro units due to the use of capacitive meters for the parameters of mechanical defects [Pidvyshchennia efektyvnosti diahnostuvannya potuzhnykh hidroahrehativ za rakhunok zastosuvannya yemnisnykh vymiriuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv]*, Hydropower of Ukraine, No 4, pp. 10-13.
2. Hraniak V. F., Kukharchuk V. V., Kucheruk V. Y. and other (2018) "Using instantaneous cross-correlation coefficients of vibration signals for technical condition monitoring in rotating electric power machine" Bulletin of the Karaganda University. "Physics" series, No 1, pp. 72-80.
3. Shirman A. R., Soloviev A. B. (1996) *Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment [Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya]*, Mechanical Engineering, Moscow, 276 p.
4. Kuharchuk V. V., Katsiv S. Sh., Granyak V. F and others (2018) *Discrete wavelet transforms in the diagnosis of hydraulic units. Monograph [Dyskretni veivlet-peretvorennia v diahnostuvanni hidroahrehativ. Monohrafiya]*, VNTU, Vinnitsa, 112 p.
5. Vorob'ev V. I., Gribunin V. G. (1999) *The theory and practice of wavelet transform [Teoriya i praktika veyvlet-preobrazovaniya]*, VSU, St. Petersburg, 204 p.
6. Kiselev Yu. V., Kiselev D. Yu., Titz S. N. (2012) *Vibration diagnostics of systems and structures of aviation technology. Textbook [Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruktsiy aviatsionnoy tekhniki. Uchebnik]*, SSASU, Samara, 207 p.
7. Broughton S. A., Bryan K. (2008) *Discrete fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 355 p.
8. Polikar R. (2001) *The Wavelet tutorial*, Rowan University, College of Engineering Web Servers, Roma, 79 p.
9. Addison P. S. (2002) *The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance*, Napier University, Edinburgh, 359 p.

Надійшла до редакції 01.02.2021

**V.F. HRANIAK<sup>1</sup>, S. SH. KATSYV<sup>1</sup>, V. V. KUHARCHUK<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Vinnitsa National Technical University (Ukraine)

Titanxp2000@ukr.net

**USING DISCRETE WAVELET ANALYSIS OF VIBRO-ACOUSTIC SIGNAL TO DETECT ROTOR IMBALANCE OF ROTATING ELECTRIC MACHINES**

The paper presents a theoretical analysis of the features of the existing methods for the numerical processing of vibro-acoustic signals and the features of the vibro-acoustic signal of a rotating electric machine. As a result, it was shown that the most applicable method for processing such a signal in order to detect features characteristic of the development of various kinds of defects is a discrete wavelet transform. In particular, the advantages of such a transformation are the ability to study signals localized in time, as well as the relative ease of mathematical transformation.

Considering the peculiarities of the vibro-acoustic signal that occurs in the presence of an imbalance in the rotor, namely the periodicity of the trend of the additional vibration introduced and its symmetry relative to the time axis when the positive part of the signal is displaced to the half of the period along the time axis, the choice of the most effective mother wavelet function was justified and frequency bands that it is advisable to analyze in order to detect the indicated defect. It is shown that the most effective in this case will be the use of the Haar wavelet and the fourth-order Daubechies wavelet. A numerical criterion was also proposed for assessing the impact of rotor imbalance on the wavelet transform coefficients in the form of the root-mean-square value of the wavelet coefficients of informative frequency bands when studying the time interval, which significantly exceeds the period of rotation of the rotor of an electric machine.

The effectiveness of using vibrational maternal wavelet-function and the proposed numerical criterion have been experimentally confirmed.

**Key words: electric machine, rotor imbalance, defect, burst, wavelet transform**