

№ 2 (2022)

ЗМІСТ

СТАТТІ

Аналіз енергетичних втрат в теплоутилізаційних системах котельних установок при реалізації методу байпасування для захисту димових труб N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska, S. Shevchuk	PDF 5-17 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.005
Експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище при мезофільному режимі зброжування M. Zablodskiy, M. Spodoba, O. Spodoba	PDF 18-32 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.018
Вплив відключень електроенергії на електроприводи виробничих машин і механізмів O. Sinyavsky, V. Savchenko, D. Kabanov	PDF 33-38 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.033
Покращення аеродинамічних характеристик процесу досушки на основі локального підходу T. Suprun	PDF 39-51 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.039
Експериментальний стенд для дослідження енергетичних характеристик роботи побутових відцентрових насосів з можливістю їх паралельного та послідовного з'єднання V. Vasilenkov, Yu. Shurub	PDF 52-63 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.052
Використання дискретного вейвлет-аналізу вібро-акустичного сигналу для виявлення дефектів підшипників обертових електричних машин V. Hraniak, L. Chervinsky	PDF 64-78 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.064
CFD моделювання модульного утримання птахи V. Trokhamiak, N. Spodyniuk	PDF 79-93 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.079
Пошукова геометричних ліній, як граничних траєкторій руху матеріальних частинок по поверхні S. Rybuzak, A. Nesvidomin	PDF (ENGLISH) 94-100 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.094
Вибір критерію оцінки стійкості при проектуванні технологічних систем виробництва біогазу V. Ramish, M. Potarenko, V. Sharshon	PDF 101-110 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.101
Оцінка області допусків на параметри коректування в індукційних системах прискорювання L. Pantalienko	PDF 111-121 http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.02.111

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор:

Козирський Володимир Вікторович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-6780-9750>

Заступник головного редактора:

Снявський Олександр Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Відповідальний секретар:

Савченко Віталій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <http://orcid.org/0000-0001-8260-6038>

Члени редакційної колегії:

спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Бойко Володимир Васильович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <http://orcid.org/0000-0003-2926-2752>

Болбот Ігор Михайлович, доктор технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Гребченко Микола Васильович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-0055-9042>

Жильцов Андрій Володимирович, доктор технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-1688-7879>

Заблодський Микола Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-8889-8158>

Капун Віктор Володимирович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7040-9344>

Кондратенко Ігор Петрович, доктор технічних наук, член - кореспондент НАН України, Інститут електродинаміки НАН України, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>

Лисенко Віталій Паліпович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Лисиченко Микола Леонідович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна

Мороз Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна

Назаренко Ігор Петрович, доктор технічних наук, професор, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Нікіфоров Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Нурек Томаш, доктор технічних наук, професор, Варшавський університет наук про життя, Польща

Тугай Юрій Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Федорейко Валерій Степанович, доктор технічних наук, професор, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Україна

Харченко Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Хоховські Анджей, доктор технічних наук, професор, Варшавський університет наук про життя, Польща

Червінський Леонід Степанович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7215-2474>

Чміль Анатолій Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <http://orcid.org/0000-0001-9148-3172>

Яшкевич Юрій, доктор технічних наук, професор, університет Британської Колумбії, Канада

спеціальність 144 – теплоенергетика

Горобець Валерій Григорович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Давиденю

спеціальність 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Дудник Алла Олексівна, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Коваль Валерій Вікторович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Мартиненко Олексій

Решетює Володимир Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Шворов Сергій Андрійович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, <https://orcid.org/0000-0003-3358-1297>

ISSN: 2223-0858

ВИКОРИСТАННЯ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ ВІБРО-АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В. Ф. Граняк, кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний аграрний університет

Л. С. Червінський, доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування

E-mail: titanxp2000@ukr.net

Анотація. У роботі показано, що одним з найбільш ефективних методів обробки часової реалізації вібро-акустичного сигналу електричних машин є дискретне вейвлет-перетворення. Про те, через відсутність у останньому вбудованих інструментів сепарації періодичної та аперіодичної складових, що суттєво ускладнює процес ідентифікації періодичних збурюючих чинників, виникає необхідність розробки нових підходів до виявлення періодичних складових вібросигналу на основі дискретного вейвлет-перетворення, які можуть викликатися рядом дефектів обертових електричних машин.

Запропоновано новий інтегральний високоінформативний числовий критерій наявності дефектів підшипників, отриманий на основі дискретного вейвлет-перетворення вібро-акустичного сигналу електричної машини. Встановлено, що при виявленні зазначеного дефекту доцільно аналізувати смуги частот, які включають у себе роторну частоту та її перші гармонічні складові.

Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено доцільність використання при виявленні зазначеного дефекту материнських вейвлет-функції старших порядків. Показано, що виходячи з міркувань спрощення математичного апарату розрахунку та підвищення гнучкості системи діагностування доцільним є застосування сімейства вейвлетів Добеши, розрахунок коефіцієнтів яких передбачає використання чіткого математичного алгоритму.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено необхідну тривалість часових реалізацій вібросигналу, що доцільно використовувати при визначенні запропонованого високоінформативного числового критерію. Показано, що тривалість таких реалізацій повинна бути суттєво більшою за період обертання ротора електричної машини.

Ключові слова: електрична машина, підшипник, дефект, вейвлет-перетворення, інтегральний критерій

Актуальність. Стійкою тенденцією розвитку сучасних систем контролю технічного стану та діагностування обертових електричних машин є широке застосування в якості вхідної інформації їх вібро-акустичного сигналу [1]. Це обумовлено як його високою чутливістю та інформативністю, так і можливістю

вимірювання вібропараметрів безпосередньо у режимі реального часу роботи електричної машини без необхідності суттєвого втручання в її конструкцію [2, 3]. Про те виділення корисної інформації з часової реалізації вібро-акустичного сигналу пов'язане з суттєвими труднощами, вирішення яких потребує розробки нових та удосконалення існуючих методів аналітичної обробки. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що у складі такого сигналу містяться як періодичні складові різної частоти, так і аперіодичні (пікові) складові, що виникають в наслідок наявності дефектів різної природи та інших періодичними та аперіодичними збуджуючих впливів [4, 5].

Серед існуючих достатньо описаних та вивчених підходів, придатних для аналізу часової реалізації вібросигналу, що може бути отриманий під час роботи реальної обертової електричної машини, можна виділити дискретне перетворення Фур'є та дискретне вейвлет перетворення (ДВП). Про те варто відзначити, що перетворення Фур'є більш трудомістке, ніж ДВП, а отже у реальній технічній системі потребуватиме більшого апаратного ресурсу для свого здійснення та не передбачає можливості дослідження локалізованих збурень взагалі [6], що суттєво обмежує його використання в сучасних системах технічного моніторингу та діагностування електричних машин. Тоді як ДВП, як подальший розвиток віконного перетворення Фур'є, в першу чергу адаптоване на виявлення локалізованих пікових збурень. У результаті чого зазначене перетворення не передбачає наявності готових інструментів, призначених для відокремлення періодичної та аперіодичної складових, що суттєво ускладнює процес ідентифікації періодичних збуджуючих чинників. Тож, враховуючи сказане, є очевидним, що розробка нових підходів до виявлення періодичних складових вібросигналу на основі ДВП, які можуть викликатися рядом дефектів обертових електричних машин, є актуальною науково-прикладною задачею, вирішення якої у перспективі дозволить суттєво підвищити ефективність роботи систем технічного моніторингу та діагностування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однією із найбільш поширених причин виходу з ладу обертових електричних машин є розвиток дефектів підшипників [7], що можуть формуватися в наслідок підвищеного тиску у радіальному напрямку через порушень технологічних або розрахункових режимів; порушення подачі мастила і його низької якості; дефектів складання і підгонки;

експлуатаційного зносу і забруднення підшипників [4, 8]. Наявність таких дефектів, зазвичай, призводить до формування нерівномірного радіального зазору в підшипнику, який, в свою чергу, обумовлює складну залежність жорсткості мастильного прошарку від кута повороту ротора. Зазначений ефект практично завжди викликає збільшення вібрації на частоті обертання ротора та її вищих гармоніках [4, 5]. Порушення верхнього і бічних зазорів у підшипнику може також призводити до розірвання масляного клина, що супроводжується підвищенням температури підшипника.

На рис. 1 показана форма сигналу віброшвидкості підшипникової опори насосного агрегату, що спостерігалася в процесі підгонки при зниженому (щодо номінального розміру) зазорі підшипника [5].

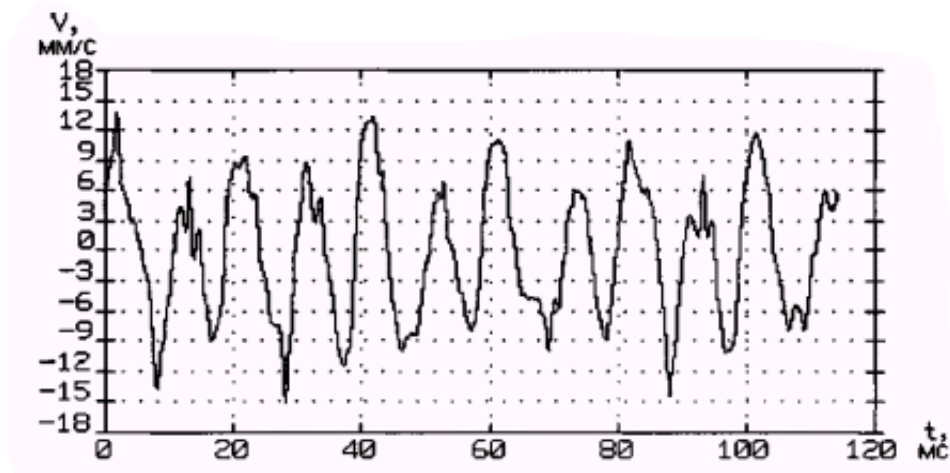


Рис. 1. Форма сигналу віброшвидкості електродвигуна при зниженому зазорі

Як впливає з рис. 1, особливістю вібросигналів, обумовлених зазначеними дефектами, є їх кванзіперіодичний характер у поєднанні з доволі складною формою сигналу. Варто відзначити і те, що при дослідженні часової реалізації віброприскорення (похідної віброшвидкості), вимірювання якого у режимі реального часу характеризується більш високою точністю та є пріоритетним при дослідженні характеристик тихохідних обертових електричних машин [9], складність форми сигналу очевидно буде підвищуватися.

Враховуючи сказане можна дійти висновку, що в результаті проведення стандартного вейвлет-аналізу наявність складових вібрації, обумовлених дефектами

підшипників, особливо на ранніх стадіях їх розвитку, не буде призводити до формування яскраво виражених локальних піків у певній частотній смузі, а, отже, буде мало помітною при аналізі сигналу, отриманого в результаті ДВП. Тож враховуючи, що дефекти підшипника, як було зазначено раніше, входять 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.

Мета дослідження – розробка високоінформативного критерію наявності дефектів підшипників обертових електричних машин, що полегшило б задачу їх виявлення на ранніх етапах розвитку, а, отже, в перспективі підвищило б ефективність роботи систем технічного моніторингу та діагностування.

Матеріали і методи дослідження. 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 за допомогою вейвлет-перетворення. У цьому випадку базисна вейвлет функція дозволяє сконцентрувати увагу на тих або інших локальних особливостях аналізованих процесів. При чому за своєю суттю деталізація неперервного вейвлет перетворення (НВП) є ні чим іншим, як визначенням функції взаємкореляції між материнською вейвлет-функцією та досліджуваним сигналом, що впливає з математичної моделі такого перетворення [6, 10]:

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

де $W(a, \tau)$ – функція деталізації (результат вейвлет перетворення); a – параметр масштабу; τ – 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 за всією віссю часу [10, 11], то фізичний зміст такого перетворення можна представити як пошук ділянок аналізованої функції в 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 так [6, 10, 11]:

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

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 як апроксимуючі коефіцієнти використовується часова реалізації досліджуваного сигналу.

Оскільки в логіку вейвлет-перетворення, як показано вище, закладений кореляційний принцип, то не важко дійти висновку, що значення коефіцієнтів окремо взятої частотної смуги будуть, у першу чергу, визначатися співпадінням форми аналізованої функції на досліджуваному масштабі (обраній частотній смузі) з формою базисної вейвлет-функції. При цьому варто зазначити, що оскільки вейвлет-перетворення в межах одного масштабу досліджує сигнал усієї часової реалізації з заданим кроком дискретизації τ [10, 11], то у випадку наявності періодичної складової у вібросигналі та виборі материнської вейвлет-функції, що буде максимально точно описувати поведінку цієї періодичної складової, варто очікувати серію симетричних додатних та 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.

У 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 вібросигналу, 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 рис. 1 та наведених у літературі описів вібро-акустичних сигналів, обумовлених пошкодженнями підшипників, показує, що зазначений дефект викликає доволі складний за формою квазіперіодичний вібраційний відгук, частота якого відповідає роторній частоті електричної машини [Ошибка! Источник ссылки не найден., 5, 8Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Враховуючи квазіперіодичність вібро-акустичного сигналу, обумовленого наявністю зазначеного дефекту, варто очікувати періодичну зміну значень вейвлет коефіцієнтів у часовій області в межах смуг частот, що включають у себе роторну частоту та її гармонічні складові. При чому амплітуди таких періодичних змін будуть напряму пов'язані зі ступенем розвитку дефекту. Тому виконується така нерівність:

$$t_{cn} \gg T_p, \quad (4)$$

де t_{cn} – тривалість часової реалізації досліджуваного сигналу; T_p – період обертання ротора електричної машини,

що підтверджує доцільність застосування інтегрального підходу до аналізу коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Враховуючи ту обставину, що за наявності зазначеного дефекту, як показано вище, вібраційний відгук у межах одного періоду характеризуватиметься декількома піками [4, 5, 8], є очевидним, що для виявлення зазначеного дефекту доцільним буде застосування материнських вейвлет-функцій старших порядків. Це пояснюється тим, що при зростанні порядку материнської вейвлет-функції типово зростає число

її осциляцій. Тому для вейвлет-функції N -го порядку буде справедливим вираз [6, 10, 11]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (5)$$

Оскільки розрахунок коефіцієнтів переважної більшості дискретних вейвлет-функцій є доволі трудомістким [10-12], а форма вібраційного відгуку при пошкодженнях підшипників характеризується доволі складною структурою, яка однозначно не асоціюється з жодним із відомих вейвлетів, як базові вейвлет функції будемо послуговуватися вейвлетами Добеши. Головною перевагою зазначеного сімейства вейвлет-функцій є можливість відносно простого аналітичного розрахунку їх коефіцієнтів для функції довільного порядку [10].

Враховуючи сказане, було сформульовано математичний числовий критерій оцінки впливу наявності дефектів підшипників на коефіцієнти вейвлет-перетворення частотних смуг, що включають у себе роторну частоту та її гармонічні складові:

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

Результати досліджень та їх обговорення. Метою підтвердження неведених вище теоретичних міркувань було проведено експериментальне дослідження з використанням асинхронної електричної машини АИР80А6У2, номінальною потужністю 0,75 кВт та синхронною швидкістю обертання 1000 об/хв (16,67 Гц) при її експлуатації в режимі холостого ходу. Дефект підшипника було імітовано шляхом застосування підшипників за відсутності масляної плівки. Ємнісний мікромеханічний акселерометр було закріплено на корпусі електричної машини так, щоб вимірювальні осі сенсора були строго перпендикулярними до осі ротора, вісь X – напрямлена строго вертикально, вісь Y – строго горизонтально. Частота дискретизації сигналу становила 232 Гц, довжина часової реалізації досліджуваного сигналу – 2^{14} значень.

При перетворенні отриманого сигналу віброприскорення за допомогою вейвлета Добеши 4-го порядку та подальшого розрахунку середньо-квадратичного вейвлет-

коефіцієнтів для кожної із частотних смуг при роботі електричної машини в режимі холостого ходу було отримано результати, наведені на рис. 2 – рис. 5.

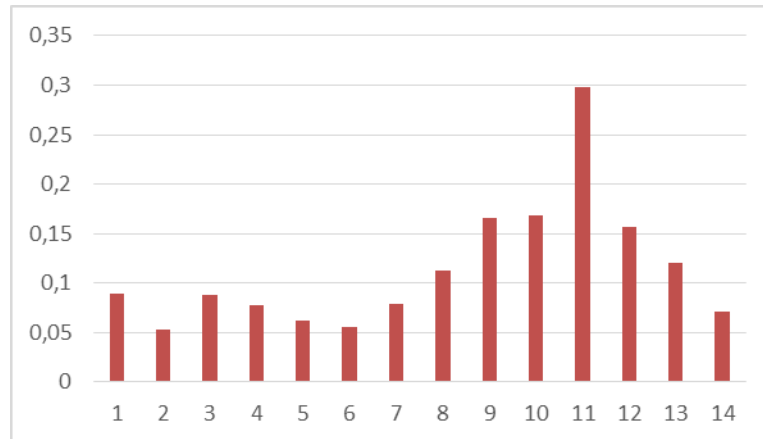


Рис. 2. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за наявності мастила в підшипнику

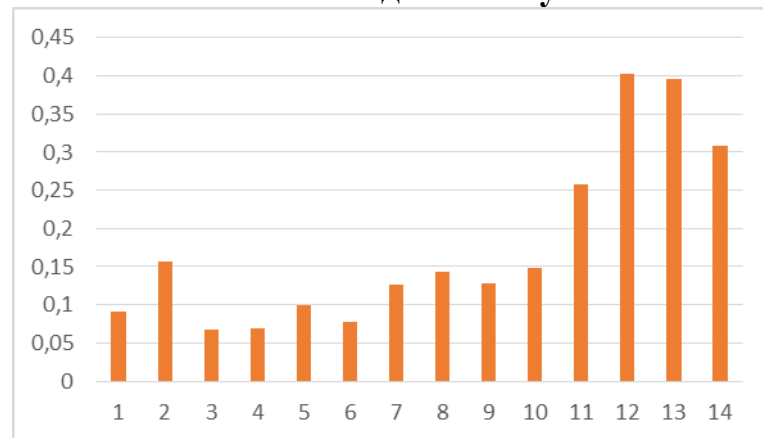


Рис. 3. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за відсутності мастила в підшипнику

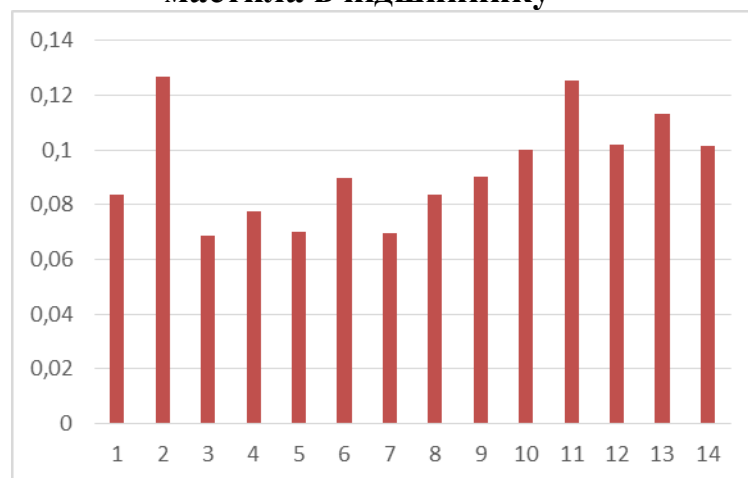


Рис. 4. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за наявності мастила в підшипнику

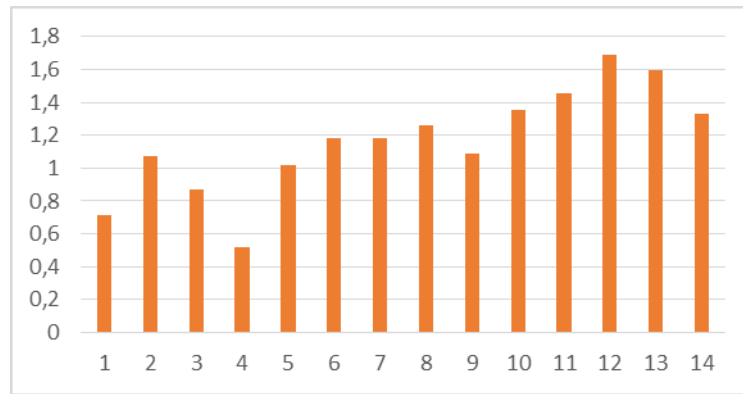


Рис. 5. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 4-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за відсутності мастила в підшипнику

Аналогічне перетворення отриманого вібросигналу було виконано за допомогою вейвлета Добеши 6-го порядку. Результати розрахунку наведені на рис. 6 – рис. 9.

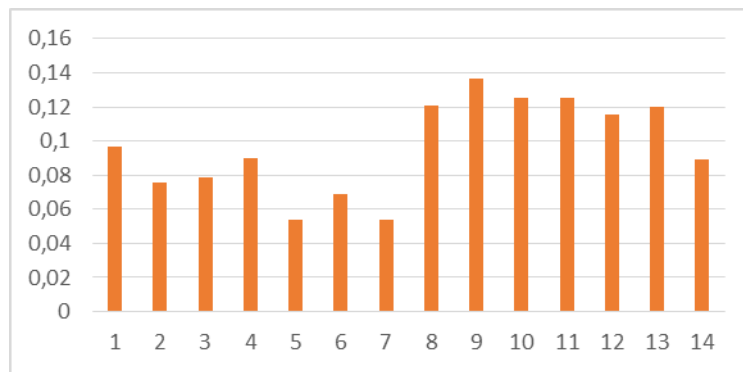


Рис. 6. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за наявності мастила в підшипнику

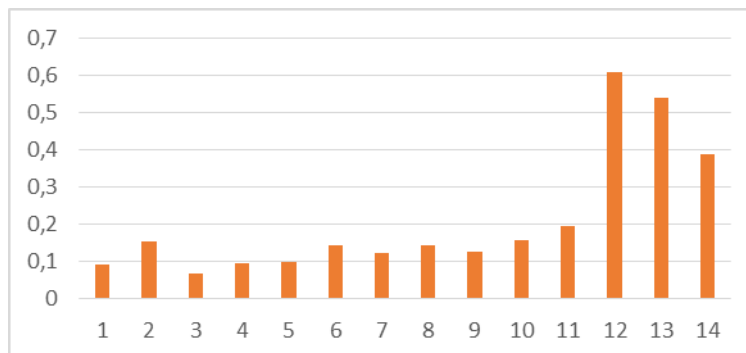


Рис. 7. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за відсутності мастила в підшипнику

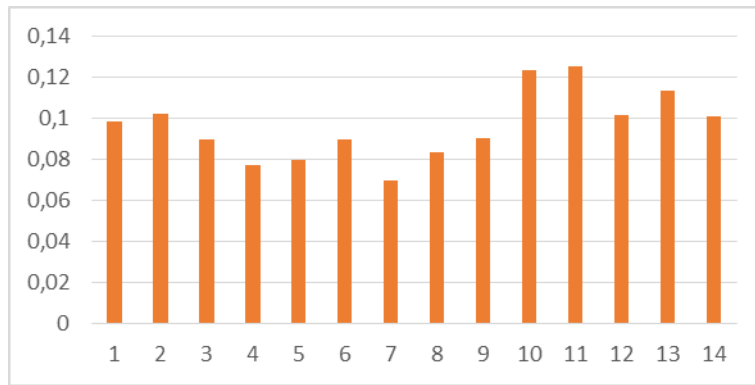


Рис. 8. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за наявності мастила в підшипнику

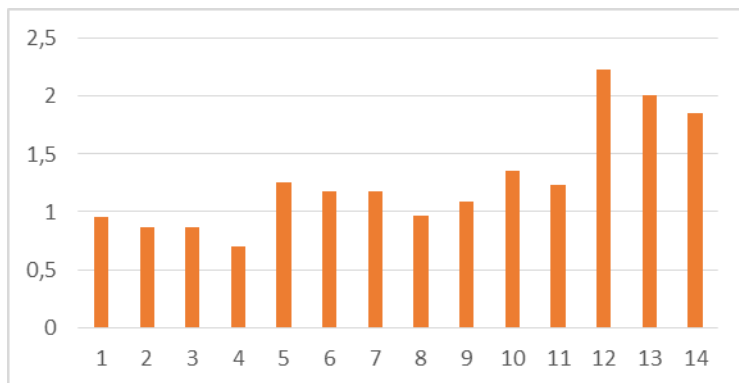


Рис. 9. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 6-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за відсутності мастила в підшипнику

Також було здійснено перетворення отриманого вібросигналу за допомогою вейвлета Добеши 8-го порядку. Результати розрахунку наведені на рис. 10 – рис. 13.

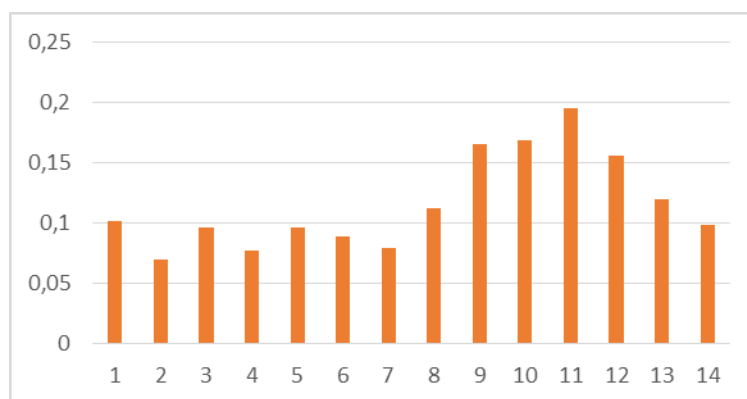


Рис. 10. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 8-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за наявності мастила в підшипнику

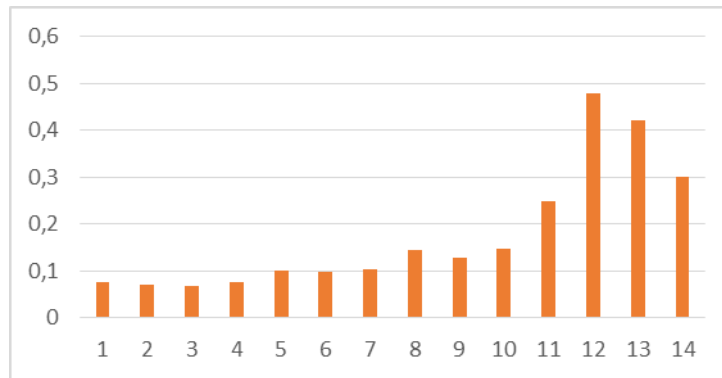


Рис. 11. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 8-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю X за відсутності мастила в підшипнику

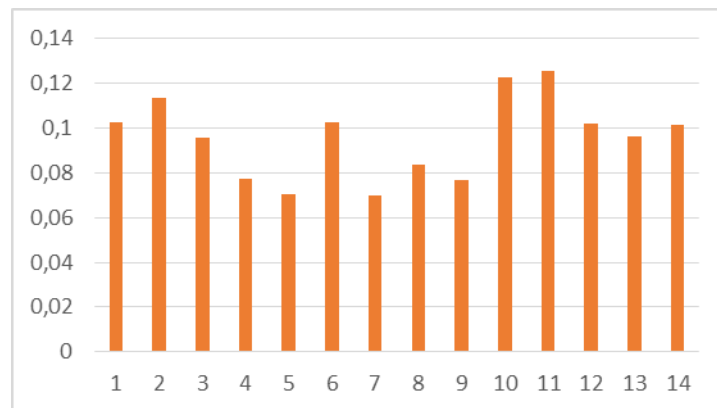


Рис. 12. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 8-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за наявності мастила в підшипнику

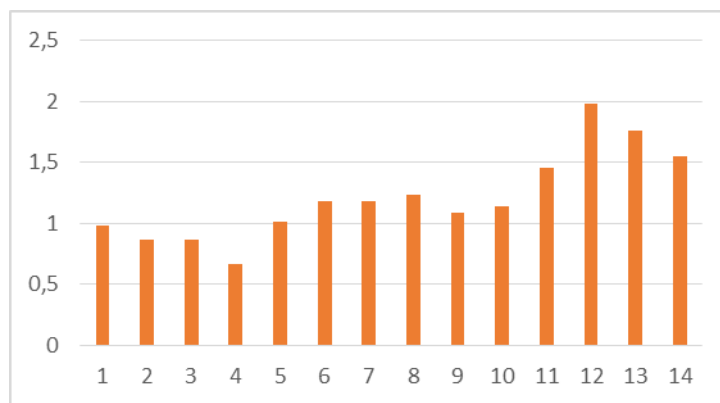


Рис. 13. Залежність середньоквадратичного вейвлет коефіцієнтів Добеши 8-го порядку для кожної із частотних смуг вібросигналу за віссю Y за відсутності мастила в підшипнику

Як випливає з аналізу залежностей, наведених на рис. 2 – рис. 13, найбільш інформативними для виявлення дефекту підшипників, як і очікувалося, є частотна смуга, що відповідає частоті обертання ротора, приблизно 16,67 Гц (12 частотна смуга) та її друга (13 смуга частот) і третя (14 смуга частот) гармоніки. Порівняння ж

результатів, отриманих при розкладанні сигналу на основі вейвлету Добеши 4-го, 6-го та 8-го порядку показали, що найбільшу чутливість запропонованого числового критерію оцінки впливу наявності дефектів підшипників було отримано при використанні материнського вейвлету 6-го порядку. Це підтверджує наведені вище теоретичні висновки про високу спорідненість вібро-акустичного відгуку зазначеного дефекту з вейвлет-функціями більш високих порядків за рахунок наявності у ньому значної кількості осциляцій.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Вперше запропоновано інтегральний високоінформативний числовий критерій оцінки впливу дефектів підшипників на коефіцієнти вейвлет-перетворення у вигляді середньоквадратичного значення вейвлет коефіцієнтів інформативних смуг частот, що включають у себе роторну частоту та її гармонічні складові. Теоретично обґрунтовано доцільність при виявленні зазначеного дефекту застосування материнських вейвлет-функції старших порядків. Експериментально доведено зроблені теоретичні висновки.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено необхідну тривалість часових реалізацій вібросигналу, що доцільно використовувати при визначенні запропонованого високоінформативного числового критерію оцінки впливу дефектів підшипників на коефіцієнти вейвлет-перетворення. Показано, що тривалість таких реалізацій повинна бути суттєво більшою за період обертання ротора електричної машини.

Список використаних джерел

1. Фізичні процеси в роторах енергетичних і електричних машин і способи підвищення їхньої надійності / Г. Г. Счастливий, О. І. Титко, В. Л. Ахременко, Ю. М. Васьковський // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Збірник наукових праць. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2010. – Вип 26. – С. 105-113.

2. Левицький А. С. Підвищення ефективності діагностування потужних гідроагрегатів за рахунок застосування емнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / А. С. Левицький // Гідроенергетика України. – 2010. – № 4. С. 10-13.

3. 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. – 2018. – No 1. – P. 72-80

4. Ширман А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев – М.: Машиностроение, 1996. – 276 с.

5. Дискретні вейвлет-перетворення в діагностуванні гідроагрегатів: монографія / В. В. Кухарчук, С. Ш. Каців, В. Ф. Граняк, С. О. Биковський – Вінниця: ВНТУ, 2018 – 112 с.

6. Broughton S. A. Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing / S. A. Broughton, K. Bryan – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008 – 355 p.

7. ИТГ Энергомаш. Определение неисправности асинхронного двигателя. Донецк, 2021. Режим доступа: <http://energo.ucoz.ua/publ/5-1-0-10>.

8. Analysis of the impacts of bearing on vibration characteristics of rotor / P. Yang, Q. Yuan, Ch. Huang and other // Vibration-Based Damage Identification and Condition Monitoring in Mechanical Structures and Components. – 2017. – Vol. 2017. – 7 p. DOI: 10.1155/2017/8098591

9. Кухарук В. В. Вимірювання параметрів обертального руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи: монографія / В. В. Кухарук, Ю. Г. Ведміцький, В. Ф. Граняк – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 152 с.

10. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

11. Polikar R. The Wavelet tutorial / R. Polikar – Roma: Rowan University, College of Engineering Web Servers, 2001 – 79 p.

12. Patrick J. Discrete Wavelet Transformations: An Elementary Approach with Applications, 2nd Edition / J. Patrick, V. Fleet – New York: Wiley, 2019. – 624 p.

References

1. Schastlivyi, H. H., Tytko, O. I., Akhremenko, V. L., Vaskovskyi, Y. M. (2010). Fizychni protsesy v rotorakh enerhetychnykh i elektrychnykh mashyn i sposoby pidvyshchennia yikhnoi nadiinosti [Physical processes in the rotors of power and electrical machines and ways to increase their reliability]. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collection of scientific papers. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NASU, 26, 105-113.

2. Levytskyi, A. S. (2010). Pidvyshchennia efektyvnosti diahnostuvannia potuzhnykh hidroahrehativ za rakhunok zastosuvannia yemnisnykh vymiriuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv [Improving the efficiency of diagnosing powerful hydraulic units through the use of capacitive meters for the parameters of mechanical defects]. Hydropower of Ukraine, 4, 10-13.

3. Hraniak, V. F., Kukharchuk, V. V., Kucheruk, V. Y. and other (2018). Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya. Bulletin of the Karaganda University. «Physics» series. 1, 72-80.

4. Shyrman, A. R., Solovev, A. B. (1996). Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment]. Moscow: Mechanical Engineering, 276.

5. Kukharchuk, V. V., Katsyv, S. Sh., Hraniak, V. F., Bykovskiy, S. O. (2018). *Dyskretni veivlet-peretvorennia v diahnostuvanni hidroahrehativ* [Discrete wavelet transforms in the diagnosis of hydraulic units]: a monograph. Vinnytsia: VNTU, 112.
6. Broughton, S. A., Bryan, K. (2008). *Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 355.
7. ITG Energomash (2021). *Determination of malfunction of an induction motor*. Available at: <http://energo.ucoz.ua/publ/5-1-0-10>.
8. Yang, P., Yuan, Q., Huang, Ch, Zhou, Y. and other (2017). *Analysis of the impacts of bearing on vibration characteristics of rotor*. *Vibration-Based Damage Identification and Condition Monitoring in Mechanical Structures and Components*, 2017, 7. DOI: 10.1155/2017/8098591
9. Kukharuk, V. V., Vedmitskiy, Y. H., Hraniak, V. F. (2019). *Vymiriuvannia parametriv obertalnoho rukhu elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii v perekhidnykh rezhymakh roboty* [Measurement of parameters of rotational motion of electromechanical energy converters in transient modes of operation]: monograph. Vinnytsia: VNTU, 152.
10. Dobeshy, Y. (2001). *Desyat' lektsiy po veyvletam* [Ten lectures of wavelets]. Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 464.
11. Polikar, R. (2001). *The Wavelet tutorial*. Roma: Rowan University, College of Engineering Web Servers, 79.
12. Patrick, J., Fleet, V. (2019). *Discrete Wavelet Transformations: An Elementary Approach with Applications*, 2nd Edition. New York: Wiley, 624.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРО-АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В. Ф. Граняк, Л. С. Червинский

Аннотация. *В работе показано, что одним из наиболее эффективных методов обработки временной реализации вибро-акустического сигнала электрических машин является дискретное вейвлет-преобразование. При этом из-за отсутствия в последнем встроенных инструментов сепарации периодической и аperiodической составляющих, существенно усложняется процесс идентификации периодических возмущающих факторов, из-за чего возникает необходимость разработки новых подходов к выявлению периодических составляющих вибрации на основе дискретного вейвлет-преобразования, которые могут вызываться рядом дефектов вращающихся электрических машин.*

Предложен новый интегральный высокоинформативный числовой критерий наличия дефектов подшипников, полученный на основе дискретного вейвлет-преобразования вибро-акустического сигнала электрической машины. Установлено, что при обнаружении указанного дефекта целесообразно анализировать полосы частот, которые включают в себя роторную частоту и ее первые гармонические составляющие.

Теоретически обоснована и экспериментально доказана целесообразность использования при обнаружении указанного дефекта материнских вейвлет-функции старших порядков. Показано, что исходя из соображений упрощения

математического аппарата расчета и повышения гибкости системы диагностирования, целесообразно применение семейства вейвлетов Добеши, расчет коэффициентов которых предусматривает использование четкого математического алгоритма.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено необходимую продолжительность временных реализаций вибрации, что целесообразно использовать при определении предложенного высокоинформативного числового критерия. Показано, что продолжительность таких реализаций должна быть существенно большей за период вращения ротора электрической машины.

Ключевые слова: электрическая машина, подшипник, дефект, вейвлет-преобразования, интегральный критерий.

USE OF DISCRETE WAVELET ANALYSIS OF VIBRO-ACOUSTIC SIGNALS TO DETECT BEARING DEFECTS OF ROTATING ELECTRIC MACHINES

V. Hraniak, L. Chervinsky

Abstract. *The paper shows that one of the most effective methods for processing the time realization of a vibro-acoustic signal from electrical machines is a discrete wavelet transform. At the same time, due to the lack of built-in tools for separating periodic and aperiodic components in the latter, it significantly complicates the process of identifying periodic disturbing factors, which makes it necessary to develop new approaches to identifying periodic components of vibration based on discrete wavelet transform, which can be caused by a number of defects in rotating electrical machines.*

A new integral highly informative numerical criterion for the presence of bearing defects, obtained on the basis of a discrete wavelet transform of a vibro-acoustic signal of an electric machine, is proposed. It has been found that upon detection of the indicated defect, it is advisable to analyze the frequency bands, which include the rotor frequency and its first harmonic components.

The expediency of using the parent wavelet function of higher orders upon detection of the indicated defect has been theoretically substantiated and experimentally proved. It is shown that, based on considerations of simplifying the mathematical apparatus of calculation and increasing the flexibility of the diagnostic system, it is advisable to use the Daubechies wavelet family, the calculation of the coefficients of which involves the use of a clear mathematical algorithm.

The necessary duration of time realizations of vibration is theoretically substantiated and experimentally confirmed, which is advisable to use when determining the proposed highly informative numerical criterion. It is shown that the duration of such realizations should be significantly longer than the period of rotation of the rotor of the electric machine.

Key words: *electrical machine, bearing, defect, wavelet transform, integral criterion*