



УДК 004.94:621.822

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-1

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБИВОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

Веселовська Наталія Ростиславівна, д.т.н., професор
Шаргородський Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент
Брацлавець Богдан Сергійович, аспірант
Ялина Ольга Олександрівна, аспірантка
Вінницький національний аграрний університет

N. Veselovska, PhD, Full Professor
S. Shargorodskiy, PhD, Associate Professor
B. Bratslavets postgraduate
O. Yalina, postgraduate
Vinnytsia National Agrarian University

На сьогоднішній день вібродіагностичний метод досягає найвищої ефективності та технологічності для роботи технічного стану технологічного обладнання агропромислового комплексу. У той же час цей метод є одним із найсучасніших методів технічної діагностики, що вказує кінематичні склади об'єктів діагностики.

Вібраційний аналіз є фундаментальним засобом діагностичного контролю підшипників. Сигнал вібрації дефектних підшипників кочення і його спектр містять характерні ознаки, по яких можна досить коректно виявити вид і місце знаходження дефекту. У момент проходження через навантажену зону підшипника кочення дефектного елемента у вібросигналі з'являється чітко виражений пік, енергетичний імпульс. Таким чином, при роботі підшипника із внутрішніми дефектами у вібросигналі з'являються характерні складові - гармоніки із власними частотами, чисельні значення яких можна розрахувати по теоретичних формулах, використовуючи геометричні розміри елементів підшипника і частоту обертання ротора механізму.

У навантаженому підшипнику можна виділити чотири характерні, застосовувані для діагностики частоти – частоту зовнішньої обойми підшипника, частоту внутрішньої обойми, частоту сепаратора та частоти тіл кочення.

Складність аналізу вібросигналів підшипників кочення з метою їх діагностики полягає в тому, що ознаки дефектного підшипника розподіляються на широкому діапазоні частот, мають малу коливальну енергію і носять до деякої міри випадковий характер. Крім того, вібросигнал звичайно знімається з корпусу встаткування, що містить у своєму складі підшипник, і тому містить не тільки корисну з погляду діагностики підшипника інформації, але і шум - вібрації, вироблені іншими частинами механізму.

Проведений аналіз методів діагностики дефектів підшипників на основі вейвлет-аналізу їх вібросигналів дозволяє виділити найбільш перспективний напрямок, що полягає в тому, що вібросигнал підшипника розкладається на коефіцієнти за допомогою вейвлет-аналізу, після чого із цих коефіцієнтів вибираються найбільш значимі.

Ключові слова: агропромисловий комплекс, вібродіагностичний метод, техніка, технічне діагностування, ремонт технічних засобів.

Ф. 10. Рис. 3. Літ. 15

1. Постановка проблеми

Як відмічається у [1] «Розвиток сільськогосподарського виробництва, підвищення його стійкості та економічної ефективності у визначальній мірі пов'язане з рівнем механізації основних виробничих процесів, технологічним і технічним переозброєнням на якісно новому рівні». Аналіз існуючих тенденцій забезпечення агропромислового комплексу сільськогосподарською технікою свідчить, що у сучасних умовах дуже гостро постає проблема якісної експлуатації, діагностування, та своєчасного ремонту технічних засобів що використовуються у агропромисловому комплексі.



Відповідно до ГОСТ 20911-89 метою технічного діагностування є:

- 1) визначення виду технічного стану об'єкта;
- 2) пошук місця і визначення виду несправності;
- 3) прогнозування технічного стану.

Кожний з методів має свої особливості, переваги і недоліки, у різному ступені ними досягаються і мета діагностування.

Вибір методу діагностування і ефективно його використання стосовно до конкретної ситуації – це складне науково-практичне завдання.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні вібродіагностичний метод є найбільш ефективним і технологічним для визначення технічного стану технологічного обладнання агропромислового комплексу. У той же час цей метод є одним з найскладніших методів технічної діагностики, що обумовлено кінематичною складністю об'єктів діагностування.

Вібродіагностування вступило в активну фазу розвитку в середині 60-х років минулого століття і є одним із напрямків, що динамічно розбудовуються.

У агропромисловому комплексі діагностування стало впроваджуватись із середини 90-х років і фактично відразу зайняло провідне місце серед методів неруйнуючого контролю колісно-моторних і колісно-редукторних вузлів, двигунів, приводів конвеєрів та інших елементів машин що використовуються у агропромисловому комплексі.

Підшипники кочення широко застосовуються в устаткуванні різного призначення. Тому існує необхідність у створенні автоматизованих діагностичних систем, які могли б визначати дефекти підшипників на як можна більш ранніх стадіях. Рання ідентифікація дефектів дозволяє зменшити час простою встаткування, періоди технічного обслуговування, а також уникнути аварій і катастрофічних руйнувань.

Залежно від природи оброблюваних даних діагностичні методи виявлення й класифікації дефектів підшипників можуть бути розділені на наступні напрямки: вібраційна і акустична діагностика, контроль температури, аналіз змащення або електричного струму. На практиці завдяки відносній доступності одержання даних і різноманітності методів їх наступної обробки найбільше поширення одержала вібродіагностика [2, 3]. Недоліком традиційних методів вібродіагностики є їх сильна чутливість до шуму і необхідність прийняття рішення людиною для забезпечення їх ефективної роботи.

Останнім часом усе більший розвиток одержують методи вібродіагностики, засновані на вейвлет-аналізі, який є ефективним засобом для локалізації й класифікації особливих крапок нестационарних сигналів і дозволяє проводити аналіз одночасно в частотній і тимчасовій областях [4-7].

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розгляд існуючих підходів до виявлення дефектів підшипників кочення шляхом аналізу їх вібросигналів за допомогою вейвлет-перетворення.

Постановка завдання. Вібраційний аналіз є фундаментальним засобом діагностичного контролю підшипників. Сигнал вібрації дефектних підшипників кочення і його спектр містять характерні ознаки, по яких можна досить коректно виявити вид і місце знаходження дефекту. У момент проходження через навантажену зону підшипника кочення дефектного елемента у вібросигналі з'являється чітко виражений пік, енергетичний імпульс. Таким чином, при роботі підшипника із внутрішніми дефектами у вібросигналі з'являються характерні складові – гармоніки із власними частотами, чисельні значення яких можна розрахувати по теоретичних формулах, використовуючи геометричні розміри елементів підшипника і частоту обертання ротора механізму.

3. Основні результати дослідження

У навантаженому підшипнику можна виділити чотири характерні, застосовувані для діагностики частоти – частоту зовнішньої обойми підшипника, частоту внутрішньої обойми, частоту сепаратора й частоти тіл кочення. Вирази для визначення цих характерних частот для підшипника з нерухливою зовнішньою обоймою мають вигляд [8]:

- 1) частота перекочування тіл кочення по зовнішній обоймі:



$$F_{BPF0} = 0.5 \cdot z \cdot f \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right), \quad (1)$$

- 2) частота перекочування тіл кочення по внутрішній обоймі:

$$F_{BPF1} = 0.5 \cdot z \cdot f \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right), \quad (2)$$

- 3) частота сепаратора:

$$F_{FTF} = 0.5 \cdot f \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right), \quad (3)$$

- 4) частота перекочування тіл кочення:

$$F_{BSF} = 0.5 \cdot f \cdot \frac{D}{d} \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos(\alpha) \right)^2 \right), \quad (4)$$

де z – кількість тіл кочення в одному ряді підшипника; f – частота обертання вала; d – діаметр тіла кочення; D – середній діаметр сепаратора; α – кут контакту тіла кочення з обоймою.

Однак вирази для обчислення характерних частот (1)-(4) є приблизними і не завжди збігаються з реальними значеннями. Складність полягає в тому, що вони містять у собі кут контакту тіл кочення з обоймами. Цей параметр не завжди точно відомий і в процесі роботи підшипника може змінювати своє значення. Досить часто навіть при наявності в підшипнику явного дефекту у вібросигналі характерні частоти можуть бути повністю відсутніми, мати зрушення по частоті або мати дуже малий рівень.

Складність аналізу вібросигналів підшипників кочення з метою їх діагностики полягає в тому, що ознаки дефектного підшипника розподіляються на широкому діапазоні частот, мають малу коливальну енергію і носять до деякої міри випадковий характер. Крім того, вібросигнал звичайно знімається з корпусу встаткування, що містить у своєму складі підшипник, і тому містить не тільки корисну з погляду діагностики підшипника інформації, але і шум - вібрації, вироблені іншими частинами механізму.

Таким чином, виникає завдання створення ефективної методики аналізу вібросигналу підшипника, а саме його очищення від стороннього шуму й виділення характерних ознак або ж імпульсних особливостей, що дозволяють судити про стан підшипника, наявності й місці положення дефектів.

Методи діагностики дефектів підшипників. Необхідність ефективного обслуговування і безпечного функціонування підшипників привела до розробки широкого діапазону методів діагностичного контролю технічного стану підшипників на основі вейвлет-аналізу.

Застосування вейвлет-перетворення в даних методах можна розділити на два напрямки.

1. *Застосування граничної вейвлет-обробки для очищення вібросигналов підшипника від шуму.*

Алгоритми граничної вейвлет-обробки дозволяють виділити у вихідному неочищеному сигналі слабкі імпульсні складові [7]. Для їхньої ефективної роботи необхідно розв'язати два завдання. По - перше, вибрати вейвлет, за допомогою якого проводиться вейвлет - розкладання сигналу. По-друге, вибрати підходящий граничний рівень, який відтинав би шумову складову й залишав в очищеному сигналі імпульсні ознаки дефекту. Значення порога може бути однаковим для всіх рівнів вейвлет-розкладання сигналу, або розраховуватися окремо на кожному рівні. Далі оброблений вібросигнал може бути проаналізований стандартними методами спектрального аналізу, наприклад, за допомогою аналізу Фур'є.

Найбільш популярним вейвлетом, за допомогою якого виконується гранична обробка вібросигналов підшипників є вейвлет Морле, форма якого подібна до форми імпульсів, що виникають при проходженні елемента кочення через зону дефекту.

У роботах [9, 10] показані результати застосування вейвлетів Морле для граничної обробки вібросигналов бездефектних підшипників і підшипників з дефектами на зовнішній і внутрішній обоймах із застосуванням твердих і м'яких багатомасштабних порогів. Даний алгоритм демонструє високу ефективність своєї роботи, однак в обчислювальному плані є досить громіздким. Для кожного аналізованого сигналу він вимагає попереднього знаходження оптимальних параметрів форми вейвлета за допомогою методу мінімальної ентропії Шеннона, а також обчислення граничних значень на кожному рівні вейвлет-декомпозиції.

У роботі [11] рівняються алгоритми визначення дефектів підшипників, заснованих на граничній обробці сигналів за допомогою вейвлетів Морле і Хаара. Показане, що дані алгоритми мають приблизно однакову ефективність, однак обчислювальна складність алгоритму, що використовує вейвлети Хаара, значно нижче.

2. *Застосування вейвлет-перетворення для виділення характерних дефектних ознак з вібросигналу.* Отримані в результаті вейвлет-розкладання вібросигналу коефіцієнти в найпростішому випадку можуть бути проаналізовані в певних частотних діапазонах у пошуках характерних частот або розглянуті їхні спектральні характеристики. У більш складних методах коефіцієнти вейвлет-декомпозиції



після проміжної обробки для зменшення їх розмірності або вибору найбільш значимих з них (наприклад, статистичними методами) можуть бути використані в якості входів штучних нейронних мереж для класифікації типу дефекту і визначення ступені зношування підшипника. Крім того, для аналізу вибросигналов також можуть бути використані вейвлет-нейронні мережі, у яких вейвлети використовуються в якості функцій активації [12].

У роботі [13] для виявлення дефектів підшипників кочення розглядається енергетичний спектр, що обгинає вейвлет-розкладання вибросигналу, виконуваного за допомогою вейвлета Лапласа. Параметри форми вейвлета оптимізуються для кожного аналізованого вибросигналу шляхом знаходження максимального ексцесу коефіцієнтів, одержуваних у результаті вейвлет-розкладання сигналу. У даній роботі показана перевага даного методу перед використанням спектра, одержуваного за допомогою швидкого перетворення Фур'є, і спектром, що обгинає, одержуваного за допомогою перетворення Гілберта.

У роботі [14] показано спільне застосування вейвлет-розкладання і нейронної мережі для діагностики дефектів. За допомогою вейвлетів Добеши-6 вибросигнал підшипника розкладається на п'ять рівнів декомпозиції. У якості характеристичних ознак дефектів авторами були обрані коефіцієнти, що деталізують, на 5-ом рівні розкладання. Для класифікації стану підшипника коефіцієнти після нормалізації подаються на вхід тришарового перцептрона з лінійної дискриминантної функцією і сигмоїдною функцією активації. У роботі також проведений аналіз найбільш підходящої топології нейронної мережі.

У роботі [15] представлений алгоритм створення вейвлетної радіально-базисної нейронної мережі. Навчання такої мережі досить складно й складається з визначення центрів базисної функції, ширини базисної функції, загального числа дозволів, кількості базисних функцій на кожному рівні, а також ваг мережі. Показане що, використовуючи таку вейвлетну нейронну мережу можна не тільки виділити дефектні ознаки підшипника, але й передбачити подальший розвиток дефекту. Однак для навчання й тестування такої нейронної мережі необхідно велика кількість вихідних даних.

Щоб добитися найбільш ефективного виділення дефектних ознак з вибросигналов підшипників, необхідно правильно вибрати тип вейвлета, за допомогою якого аналізується сигнал. Ряд дослідників у якості вейвлетів для аналізу вибросигналів підшипників використовують традиційні вейвлети: Добеши різних порядків, Хаара, Морле, Мексиканський капелюх і ін. [9-13]. Однак є роботи, у яких для такого аналізу створюються спеціалізовані вейвлети. Наприклад, у роботі [13] показаний процес аналітичного створення вейвлета за допомогою масштабуючої функції, виведеної з реальної реакції кулькового підшипника на імпульсне збурювання. Результати застосування отриманого вейвлета і традиційного вейвлета Добеши - 4 для аналізу вибросигнала підшипника кочення з метою його діагностики показали більшу стійкість створеного вейвлета до шуму у вибросигналі, що робить його більш ефективним.

Як зазначено у [10], вейвлет-перетворення - перетворення, схоже на перетворення Фур'є (або набагато більше на віконне перетворення Фур'є) із зовсім іншою оцінною функцією. Основна відмінність лежить у наступному: перетворення Фур'є розкладає сигнал на складові у вигляді синусів і косинусів, тобто функцій, локалізованих у Фур'є-Просторі; напроти, вейвлет-перетворення використовує функції, локалізовані як у реальному, так і у Фур'є-Просторі. Загалом, вейвлет-перетворення може бути виражене наступним рівнянням:

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\psi_{(a,b)}^*(x)dx \quad (5)$$

де * – символ комплексної спряженості і функція; ψ – деяка функція.

Функція може бути обрана довільним образом, але вона повинна задовольняти певним правилам.

Як видно, вейвлет-перетворення насправді є нескінченною безліччю різних перетворень залежно від оцінюваної функції, використаної для його розрахунків. Це є основною причиною, чому термін «вейвлет-перетворення» використовується в досить різних ситуаціях і для різних застосувань. Також існує безліч типів класифікації варіантів вейвлет - перетворення. Тут ми покажемо тільки розподіл, заснований на ортогональності вейвлетів. Можна використовувати *ортогональні вейвлети* для дискретного вейвлет-перетворення і *неортогональні вейвлети* для безперервного. Ці два види перетворення мають наступні властивості:

1. Дискретне вейвлет-перетворення повертає вектор даних тієї ж довжини, що й вхідний. Звичайно, навіть у цьому векторі багато даних майже дорівнюють нулю. Це відповідає факту, що він розкладається на набір вейвлетів (функцій), які ортогональні до їхнього паралельного переносу і масштабуванню. Отже, ми розкладаємо подібний сигнал на те ж саме або менше число коефіцієнтів вейвлет-спектра, що й кількість точок даних сигналу. Подібний вейвлет-спектр досить гарний для обробки і стиску сигналів, наприклад, оскільки ми не одержуємо тут надлишкової інформації.

2. Безперервне вейвлет-перетворення, навпаки, повертає масив на один вимір більше вхідних даних. Для одномірних даних ми одержуємо зображення площини доба-частота. Можна легко простежити



зміну частот сигналу протягом його тривалості й порівнювати цей спектр зі спектрами інших сигналів. Оскільки тут використовується неортогональний набір вейвлетів, дані високо корельовані і мають велику надмірність. Це допомагає бачити результат у більш близькому людському сприйняттю вигляді.

Дискретне вейвлет-перетворення - реалізація вейвлет-перетворення з використанням дискретного набору масштабів і переносів вейвлета, що підкоряються деяким певним правилам. Інакше кажучи, це перетворення розкладає сигнал на взаємно ортогональний набір вейвлетів, що є основною відмінністю від безперервного вейвлет-перетворення, або його реалізації для дискретних тимчасових рядів, іноді називаної безперервним вейвлет-перетворенням дискретного часу.

Вейвлет може бути сконструйований з функції масштабу, яка описує властивості його масштабованості. Обмеження полягає в тому, що функція масштабу повинна бути ортогональна до своїх дискретних перетворень, що має на увазі деякі математичні обмеження на них

$$\phi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \phi(Sx - k) \quad (6)$$

де S – фактор масштабу (звичайно вибирається як 2).

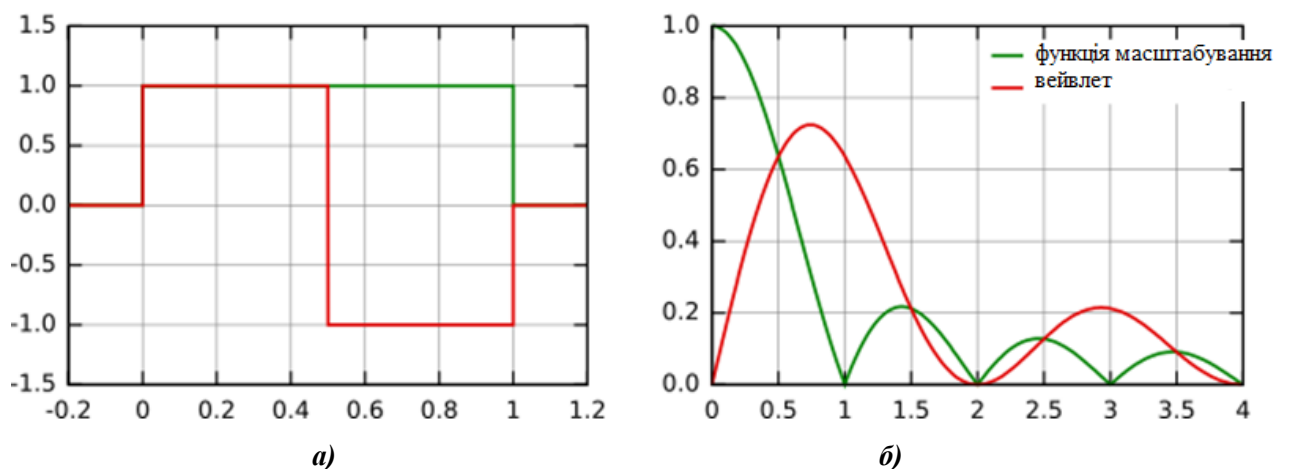
Більше того, площа під функцією повинна бути нормалізована і функція масштабування повинна бути ортогональна до своїх чисельних переносів, тобто

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \phi(x+l) dx = \delta_{0,l} \quad (7)$$

Після введення деяких додаткових умов (оскільки вищезгадані обмеження не приводять до єдиного розв'язку) ми можемо одержати результат усіх цих рівнянь, тобто кінцевий набір коефіцієнтів a_k які визначають функцію масштабування, а також вейвлет. Вейвлет виходить із масштабуючої функції як N де N – парне ціле. Набір вейвлетів потім формує ортонормований базис, який ми використовуємо для розкладання сигналу. Слід зазначити, що звичайно тільки кілька коефіцієнтів a_k будуть ненульовими, що спрощує розрахунки.

На наступному рисунку показані деякі масштабуючі функції та вейвлети. Найбільш відомим сімейством ортонормованих вейвлетів являється сімейство Добеши. Її вейвлети звичайно позначаються числом ненульових коефіцієнтів a_k , таким чином, ми звичайно говоримо про вейвлети Добеши 4, Добеши 6, і т.п. Зі збільшенням числа коефіцієнтів вейвлета функції стають більш гладкими. Це явно видно при порівнянні вейвлетів Добеши 4 і 20, представлених нижче. Іншим зі згаданих вейвлетів – найпростіший вейвлет Хаара, який використовує прямокутний імпульс як масштабуючу функцію (Рис. 1, 2, 3).

Дискретне вейвлет-перетворення може використовуватися для простого і швидкого видалення шуму із зашумленого сигналу. Якщо ми оберемо тільки обмежене число найбільш високих коефіцієнтів спектра дискретного вейвлет-перетворення, і проведемо зворотне вейвлет-перетворення (з тим же базисом) ми можемо одержати сигнал більш-менш очищений від шуму. Є кілька способів як вибрати коефіцієнти, які потрібно зберегти.



а) Функції масштабування Хаара;
б) Амплітуди коефіцієнтів Фур'є.

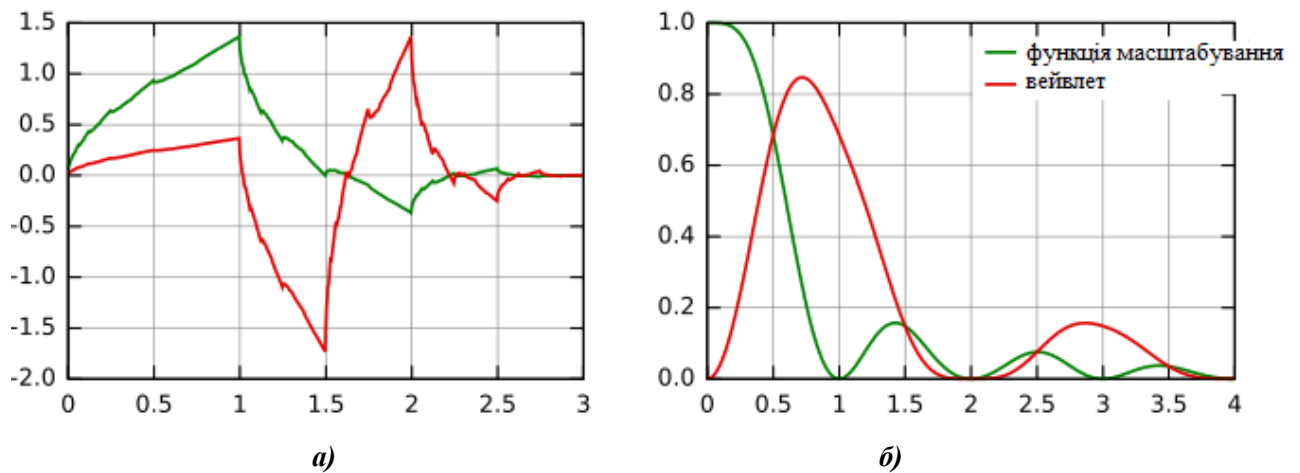


Рис. 2. Функція масштабування Добеши 4:
а) Функції масштабування і вейвлет; б) Амплітуди коефіцієнтів Фур'є.

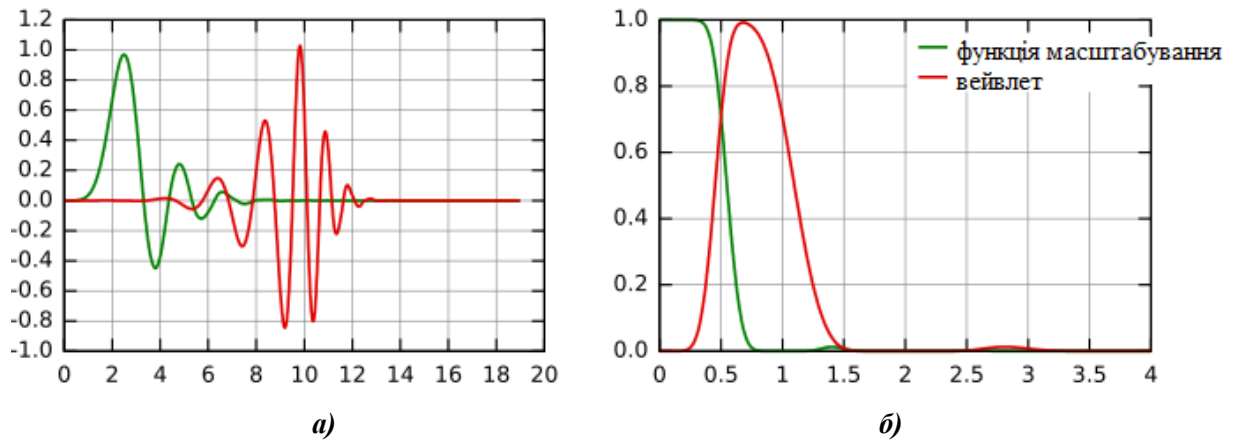


Рис. 3. Функція масштабування Добеши 20.
а) Функції масштабування і вейвлет; б) Амплітуди коефіцієнтів Фур'є.

Для найбільш високого піддіапазона частот (універсальний поріг) або для кожного піддіапазона (для адаптивного по масштабу порога) або для оточення кожного пікселя в піддіапазоні (для адаптивного по масштабу і простору порога) дисперсія розраховується як:

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n Y_{ij}^2 \quad (8)$$

Значення порога вважається в кінцевому виді як

$$T(\sigma_x) = \frac{\sigma^2}{\sigma_x}, \quad (9)$$

де

$$\sigma_x = \sqrt{\max(\sigma_Y^2 - \sigma^2)} \quad (10)$$

Коли поріг для заданого масштабу відомий, ми можемо вилучити всі коефіцієнти менше значення порога (твердий поріг) або ми можемо зменшити абсолютне значення цих коефіцієнтів на значення порога (м'який поріг).

5. Висновок

Проведений аналіз методів діагностики дефектів підшипників на основі вейвлет-аналізу їх вібросигналів дозволяє виділити найбільш перспективний напрямок, що полягає в тому, що вібросигнал підшипника розкладається на коефіцієнти за допомогою вейвлет-аналізу, після чого із цих коефіцієнтів вибираються найбільш значимі (наприклад, статистичними методами) або визначаються їхні спектральні характеристики. Отримана в результаті інформація обробляється за допомогою нейронних мереж з метою класифікації стану підшипника.



Список використаних джерел

1. Петров В. М. Соціальні питання у технічному переоснащенні сільськогосподарського виробництва. *Економіка АПК*. 2005. No 3. С. 118–125.
2. N. Tandon, A. Choudhury. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*. 1999. Vol. 32. PP. 469–480.
3. Wilfried Reimche, Ulrich Sdmersen, Oliver Pietsch, Christian Scheer, Fiedrich-Wilhelm Bach. Basics of vibration monitoring for fault detection and process control. *3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing - PANNDT*, 2-6 June, 2003. 10 p.
4. O. Rioul, M. Vetterli. Wavelets and signal processing. *IEEE SP Magazine*. 1991. PP. 14–38.
5. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
6. M. Torbatian, M. H. Kahaei, J. Poshtan. Bearing fault detection using Morlet wavelets. *18th international Conference on electricity, Tehran, Tavanir*. 21-23 October 2003. 5 p.
7. M. H. Kahaei, M. Torbatian, and J. Poshtan. Fault detection of bearings using Haar wavelets. *Proceedings of IEEE international conference, GCC*. 2004. PP. 176–179.
8. Marc Thuillard. A review of wavelet networks, wavenets, fuzzy wavenets and their applications. *ESIT 2000, Aachen, Germany*. 14-15 September 2000. 12 p.
9. Khalid F. Al-Raheem, Asok Roy, K. P. Ramachandran, D. K. Harrison, Steven Grainger. Rolling element bearing fault diagnosis using Laplace-wavelet envelope power spectrum. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 2007. Vol. 2007, Issue 1. 14 p.
10. J. C. Garcha-prada, C. Castejyn, O. J. Lara. Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction. *12th Iftom world congress in mechanism and machine science, Besamon (France)*. 17-21 June 2007. 6 p.
11. Liu Qipeng, Yu Xiaoling And Feng Quanke. Fault diagnosis using wavelet neural networks. *Neural Processing Letters*. 2003. Vol. 18, Issue 2. PP. 115–123.
12. Brian T. Holm-Hansen, Robert X. Gao, Li Zhang. Customized wavelet for bearing defect detection. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2004. Vol. 126, Issue 4. PP. 740–745.
13. Руткевич В. С. Адаптивний гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованого корму. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. No4(99). С. 108–113.
14. Токарчук О. А. Любін М.В., Яропуд В.М. Гідротранспорт в галузях агропромислового виробництва. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: VII Всеукраїн. наук.-техн. конф.* Глеваха-Київ. 2019. С. 61–63.
15. Шаргородський С.А., Янішевський В.Ю., Ялина О.О. Огляд технологій та технологічних засобів для заготівлі сінажу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. No3(110). С. 145–152.

References

- [1] Petrov, V. M. (2005). Sotsialni pytannia u tekhnichnomu pereosnashchenni silskohospodarskoho vyrobnytstva [Social issues in the technical re-equipment of agricultural production]: *Ekonomika APK*. 3. 118–125. [in Ukrainian].
- [2] Tandon, N., Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings: *Tribology International*. 32. 469–480.[in English]
- [3] Wilfried Reimche, Ulrich Sdmersen, Oliver Pietsch, Christian Scheer, Fiedrich-Wilhelm Bach. (2003). *Basics of vibration monitoring for fault detection and process control: 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing - PANNDT*, 2-6 June. [in English]
- [4] Rioul, O., Vetterli, M. (1991). *Wavelets and signal processing: IEEE SP Magazine*. 14–38. [in English]
- [5] Malla, S. (2005). *Vivlet v obrobsi syhnaliv* [Wavelets in signal processing]: M.: Mir. [In Russian]
- [6] Torbatian, M., Kahaei, M. H., Poshtan, J. (2003). Bearing fault detection using Morlet wavelets: *18th international Conference on electricity, Tehran, Tavanir*. 21-23 October. [in English]
- [7] Kahaei, M. H., Torbatian, M., Poshtan, J. (2004). Fault detection of bearings using Haar wavelets: *Proceedings of IEEE international conference, GCC*. 176–179. [in English]
- [8] Marc Thuillard. (2000). A review of wavelet networks, wavenets, fuzzy wavenets and their applications: *ESIT 2000, Aachen, Germany. 14-15 September*, 12 p. [in English]
- [9] Khalid, F. Al-Raheem, Asok Roy, Ramachandran, K. P., Harrison, D. K., Steven Grainger (2007). Rolling element bearing fault diagnosis using Laplace-wavelet envelope power spectrum. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 27, Issue 1. [in English]
- [10] Garcha-prada, J. C., Castejyn, C., Lara, O. J. (2007). Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction. *12th Iftom world congress in mechanism and machine science, Besamon (France)*. 17-21 June.. [in English]



- [11] Liu Qipeng, Yu Xiaoling And Feng Quanke (2003). Fault diagnosis using wavelet neural networks. *Neural Processing Letters*, 18(2). 115–123. [in English]
- [12] Brian, T. Holm-Hansen, Robert, X. Gao, Li Zhang. (2004). Customized wavelet for bearing defect detection. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 126(4). 740–745. [in English]
- [13] Rutkevich, V. S. (2017). Adaptivnij gidravlichnij privod blochno-porcijnogo vidokremlyuvacha konservovanogo kormu [Adaptive hydraulic drive of the block-portion separator of canned food], *Tehnika, energetika, transport APK*, 4(99), 108–113, [in Ukrainian]
- [14] Lyubin, M. V., Tokarchuk, O. A., Yaropud, V. M. (2019). Hidrotransport v galuzyah agropromislovogo virobnictva [Hydraulic transport in the fields of agro-industrial production], *Tekhnichnij progres u tvarinnictvi ta kormovirobnictvi: VII Vseukrayin. nauk.-tehn. konf., (smt Glevaha Kiyivskoyi oblasti-Kiyiv. Ukrayina, 5-28 grud. 2018 r).-Glevaha-Kiyiv*. 61–63. [in Ukrainian].
- [15] Shargorodskiy, S. A., Yanishevskiy, V. Y., Yalina, O. O. (2020). Ohliad tekhnolohii ta tekhnolohichnykh zasobiv dlia zagotivli sinazhu [Overview of technologies and technological equipment for hayme processing], *Tehnika, energetika, transport APK*, 3(110), 145–152, [in Ukrainian]

RESEARCH OF FEATURES OF DEVELOPMENT OF BEARING DEFECTS ON THE BASIS OF WAVELET ANALYSIS

Today the vibrodiagnostic method achieves the highest efficiency and manufacturability for the operation of the technical condition of the technological equipment of the agro-industrial complex. At the same time, this method is one of the most modern methods of technical diagnostics, indicating the kinematic warehouses of diagnostic objects.

Vibration analysis is a fundamental tool for diagnostic monitoring of bearings. The vibration signal of defective rolling bearings and its spectrum contain characteristic features by which it is possible to fairly correctly identify the type and location of the defect. At the moment the defective element passes through the loaded zone of the rolling bearing, a pronounced peak, an energy impulse, appears in the vibration. Thus, when a bearing with internal defects is operating, characteristic components appear in vibration - harmonics with natural frequencies, the numerical values of which can be calculated using theoretical formulas using the geometric dimensions of the bearing elements and the rotor speed of the mechanism.

In a loaded bearing, four characteristic frequencies can be distinguished that are used for diagnostics - the frequency of the outer bearing cage, the frequency of the inner cage, the cage frequency and the rolling element frequencies.

The complexity of the analysis of vibration signals of rolling bearings for the purpose of their diagnostics lies in the fact that the signs of a defective bearing are distributed over a wide range of frequencies, have low vibrational energy and are somewhat random in nature. In addition, the vibration signal is, of course, removed from the body of the equipment containing the bearing, and therefore contains not only information useful from the point of view of bearing diagnostics, but also noise - vibrations produced by other parts of the mechanism.

The analysis of methods for diagnosing bearing defects based on wavelet analysis of their vibration signals allows us to single out the most promising direction, which consists in the fact that the bearing vibration signal is decomposed into coefficients using wavelet analysis, after which the most significant coefficients are selected from these coefficients.

Key words: *agro-industrial complex, vibrodiagnostic method, equipment, technical diagnostics, repair of technical means.*

F. 10. Fig. 3. Ref. 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБИВОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

На сегодняшний день вибродиагностический метод достигает наивысшей эффективности и технологичности для работы технического состояния технологического оборудования агропромышленного комплекса. В то же время этот метод является одним из самых современных методов технической диагностики, указывает кинематические склады объектов диагностики.

Вибрационный анализ является фундаментальным средством диагностического контроля подшипников. Сигнал вибрации дефектных подшипников качения и его спектр содержат характерные признаки, по которым можно достаточно корректно выявить вид и место нахождения дефекта. В момент прохождения через нагруженную зону подшипника качения дефектного элемента в вибрации появляется четко выраженный пик, энергетический импульс. Таким образом, при работе подшипника с внутренними дефектами в вибрации появляются характерные составляющие - гармоники с собственными частотами, численные значения которых можно рассчитать по теоретическим



формулам, используя геометрические размеры элементов подшипника и частоту вращения ротора механизма.

В нагруженном подшипнике можно выделить четыре характерные, применяемые для диагностики частоты - частоту внешней обоймы подшипника, частоту внутренней обоймы, частоту сепаратора и частоты тел качения.

Сложность анализа вибросигналов подшипников качения с целью их диагностики заключается в том, что признаки дефектного подшипника распределяются на широком диапазоне частот, имеют малую колебательную энергию и несут до некоторой степени случайный характер. Кроме того, вибросигнал конечно снимается с корпуса оборудования, содержащего в своем составе подшипник, и поэтому содержит не только полезную с точки зрения диагностики подшипника информации, но и шум - вибрации, производимые другими частями механизма.

Проведенный анализ методов диагностики дефектов подшипников на основе вейвлет-анализа их вибросигналов позволяет выделить наиболее перспективное направление, которое заключается в том, что вибросигнал подшипника разлагается на коэффициенты с помощью вейвлет-анализа, после чего из этих коэффициентов выбираются наиболее значимые.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, вибродиагностический метод, техника, техническое диагностирование, ремонт технических средств.

Ф. 10. Рис. 3. Лит. 15

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Шаргородський Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).

Брацлавець Богдан Сергійович – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Ялина Ольга Олександрівна – аспірантка кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Веселовская Наталья Ростиславовна – доктор технических наук, профессор заведующий кафедры «Машины и оборудование сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Шаргородский Сергей Анатолійович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).

Брацлавець Богдан Сергеевич – аспирант кафедры «Машин и оборудования сільськогосподарського виробництва» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина).

Ялина Ольга Александровна – аспирантка кафедры «Машин и оборудования сільськогосподарського виробництва» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина).

Veselovska Nataliya – PhD, Professor of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Shargorodskiy Serhiy – PhD, Associate Professor of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua).

Bratslavets Bohdan – post-graduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine)

Yalina Olha – post-graduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine)