

УДК 004.021

- Дубровін В. І. канд. техн. наук, професор кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vdubrovin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0848-8202
- Дейнега Л. Ю. старший викладач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: deynega.larisa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0304-4327
- Павленко К. Є. студент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: pavlenkokirya02@gmail.com
- Тарасова Ю. В. канд. техн. наук, Web Developer ІТ-компанії «Freshcode», Запоріжжя, Україна, e-mail: julia.verdohleb@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2814-7907
- Федорончак Т. В. канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: t.fedoronchak@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6238-1177

## ДІАГНОСТИКА ДЕФЕКТІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

**Мета роботи.** Розробка та вдосконалення методу аналізу вібросигналів підшипників кочення на основі вейвлет-аналізу з метою виявлення та ідентифікації дефектів обладнання.

**Методи дослідження.** Застосовувався вейвлет-аналіз для обробки вібросигналів підшипників кочення. Застосовано порогову вейвлет-фільтрацію для виділення слабких імпульсних компонент у сигналах, а також використано вейвлет-Морле для забезпечення ефективності фільтрації.

**Отримані результати.** Запропонований метод з використанням вейвлет-фільтрації покращує швидкість та надійність діагностики вібраційних сигналів підшипників, що дозволяє ефективно виділяти характеристичні частоти, пов'язані з різними типами дефектів підшипників кочення.

У порівнянні з іншими методиками аналізу сигналів, використання розробленого методу на основі неперервного вейвлет-аналізу виявилось особливо ефективним для виділення характерних діагностичних частот. Цей метод дозволяє не лише ідентифікувати конкретні типи дефектів у підшипниках кочення, а й забезпечує універсальність, що дозволяє успішно застосовувати його для аналізу інших типів нестационарних сигналів.

Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність розробленого методу, особливо в ранніх стадіях розвитку дефекту. Використання цього методу виявляється не лише у здатності ефективно виділяти характеристичні частоти підшипників, але і у здатності проводити аналіз сигналів для ідентифікації дефектів обладнання взагалі. Це робить запропонований метод перспективним і універсальним інструментом для діагностики та моніторингу стану технічних систем.

**Наукова новизна.** Використання запропонованого методу обробки вібросигналів підшипників кочення на основі вейвлет-аналізу у контексті підвищення ефективності виявлення та ідентифікації дефектів обладнання.

**Практична цінність.** Розроблений метод може бути використаний в промисловому секторі для аналізу та діагностики підшипників кочення обладнання. Він дозволяє вчасно виявляти дефекти, зменшувати ризик відмов обладнання, та знижувати витрати на експлуатаційне обслуговування. Таким чином, цей метод має практичну цінність у підвищенні надійності та продуктивності промислового обладнання.

**Ключові слова:** вібросигнали, підшипники кочення, вейвлет-аналіз, дефекти обладнання, діагностика несправностей, вейвлет-фільтрація.

### Вступ

Один із перспективних напрямів вирішення задачі підвищення ефективності характеристик силових установок сучасних літальних апаратів щодо адаптивності до умов експлуатації та режимів

використання літака, надійності та ресурсу лежить в області інтегрованих систем автоматичного керування і контролю авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД).

Зношування в процесі експлуатації призводить до зміни стану і характеристик вузлів двигуна: опор роторних деталей (ушкодження підшипників),

зубчастих передач (вироблення контактних поверхонь зубців), лопаткових машин (зниження коефіцієнту корисної дії, продуктивності, запасів газодинамічної стійкості), камер згоряння (втрати), елементів проточної частини. Внаслідок цього значно змінюються як статичні, так і динамічні характеристики двигуна, що визначають його властивості як об'єкта регулювання.

Таким чином, існує необхідність розвитку методів неруйнівного контролю технічного стану вузлів ГТД під час їх експлуатації. Розробка методу автоматичного розпізнавання технічного стану вузлів двигуна, реалізованого в системі автоматичного керування (САК) двигуна, дозволить у процесі функціонування двигуна автоматично переходити до режиму керування оптимального за даних умов [1], [2].

Підшипники кочення є найбільш поширеними та, в той самий час, вразливими елементами роторних механізмів. Підшипники здійснюють просторову фіксацію обертових роторів і відбирають основну частину статичних і динамічних сил, що виникають у механізмі. Технічний стан підшипників є найважливішою складовою, яка визначає працездатність механізму в цілому.

Існує велика кількість методів діагностики стану підшипників кочення, проте вібродіагностика займає найважливіше та суттєве місце серед них.

У задачі діагностики вузлів ГТД дефекти підшипників кочення є найскладнішими для ідентифікації.

Підшипники кочення є найбільш поширеними та водночас вразливими елементами. Підшипник кочення складається з внутрішньої та зовнішньої обойми (на яких розташовані доріжки кочення), тіл кочення (кульок чи роликів) та сепаратора [3].

Виробництво підшипників кочення відбувається в умовах жорстких вимог до їх якості. Це одні з найточніших пристроїв, які виготовляються в машинобудуванні. За ідеальних робочих умов підшипники можуть безперервно експлуатуватися протягом багатьох років. Однак через те, що робочі умови рідко бувають ідеальними, підшипники ніколи не реалізують свій потенціал з точки зору ресурсу. Термін служби підшипників кочення залежить від умов їх виробництва, зберігання, обслуговування, установки, навантаження та умов роботи.

Технічний стан підшипників є важливою складовою, яка визначає працездатність механізму в цілому [4], [5]. Існує велика кількість методів діагностики стану підшипників кочення [6], проте вібродіагностика займає найважливіше та суттєве місце серед них. [7].

Аналіз вібрацій є одним із основних інструментів для виявлення ранніх дефектів [8]. Він зараз часто використовується для пошуку та діагностики дефектів підшипників в різних компонентах. Вібраційний сигнал містить в собі велику кількість інформації про технічний стан і може бути достовірним показником працездатності.

Перспективні методи аналізу нестационарних сигналів, зокрема вібраційних сигналів, базуються на використанні неперервного вейвлет-перетворення [9]. Проте відомі методи аналізу вібраційних сигналів, які використовують вейвлет-аналіз, характеризуються низькою швидкістю та обмеженою інформативністю, що суттєво обмежує практичне використання цих методів у завданнях діагностики та прийняття рішень.

### Аналіз досліджень та публікацій

Існує величезна кількість літератури з виявлення та аналізу дефектів.

У роботах [10], [11] представлені результати застосування вейвлета Морле для порогової обробки вібросигналів підшипників з використанням жорстких і м'яких багатомасштабних порогів. Даний алгоритм для кожного аналізованого сигналу виконує попереднє налаштування оптимальних параметрів форми вейвлета за допомогою методу мінімальної ентропії Шеннона, а також розраховує міні-максимальні порогові значення на кожному рівні вейвлет-декомпозиції.

Крім того, для аналізу вібросигналів також можуть бути використані вейвлет-нейронні мережі, в яких вейвлети використовуються як функції активації [12], [13].

У роботі [14] для ідентифікації механічних дефектів пропонується використовувати багатомасштабний вейвлет-аналіз. В якості параметра для налаштування параметрів вейвлет-розкладу сигналу пропонується використовувати ексцес, який дозволяє аналізувати розподіл амплітуд вібрації в часовому домені і може служити показником деградації підшипників. В роботі розглядається сімейство ортогональних вейвлетів Добеші в якості материнського вейвлета [15].

У роботі [16] запропоновано використовувати спектр огибаючої неперервного вейвлет-перетворення для визначення дефектів підшипників кочення. В якості материнського вейвлета [15] запропоновано використовувати гаусівську функцію, схожу на модель вібрації дефектного підшипника.

У роботах [17], [18] для виявлення дефектів підшипників кочення розглядається енергетичний спектр огибаючої вейвлет-розкладу вібросигналу. Параметри форми вейвлета оптимізуються для кожного аналізованого вібросигналу шляхом знаходження максимального ексцесу коефіцієнтів, отриманих в результаті вейвлет-розкладу сигналу. У даній роботі показано перевагу цього методу перед використанням спектра, отриманого за допомогою швидкого перетворення Фур'є, та спектру огибаючої, отриманого за допомогою перетворення Гільберта.

Щоб досягти найбільш ефективного виділення ознак дефектів із вібросигналів підшипників, важливо правильно обрати тип вейвлету, за допомогою якого аналізується сигнал. Деякі дослідники використовують для аналізу вібросигналів підшипників традиційні вейвлети, такі як Добеші

різних порядків, Хаар, Морле, Мексиканська шапка та інші. Проте існують роботи, в яких для такого аналізу створюють спеціалізовані вейвлети.

У роботах [19], [20] запропонований метод обробки вібросигналів підшипників кочення, заснований на використанні вейвлет-математики. Запропонований метод є вдосконаленням методу аналізу огибаючої високочастотної випадкової вібрації.

У [21], [22] запропоновано спосіб визначення оптимального вейвлет-базису на основі дослідження вейвлет-частотної характеристики.

### Мета роботи

Метою роботи є розробка та удосконалення методу аналізу вібросигналів від підшипників кочення, що ґрунтується на використанні вейвлет-аналізу, з метою ефективного виявлення та ідентифікації дефектів у промисловому обладнанні.

### Викладення основного матеріалу і результатів аналізу

Вібросигнал, що генерується підшипником, особливо при виникненні дефектів, таких як знос доріжок кочення, має імпульсний характер. У першому наближенні форму цих імпульсів можна описати моделлю у вигляді:

$$S(t) = Ue^{-at} \sin(pt + \varphi), \quad (1)$$

де  $t$  – час;

$U$  – амплітуда імпульсу;

$a$  – декремент коливань зіткнених деталей;

$p$  – власна частота коливань деталі;

$\varphi$  – початкова фаза коливань.

Розглянемо детальніше, як розвиток дефекту впливає на спектр вібросигналу підшипника. На рис. 1 [2] зображено зміну спектральних характеристик вібросигналу підшипника кочення зі зростанням дефекту.

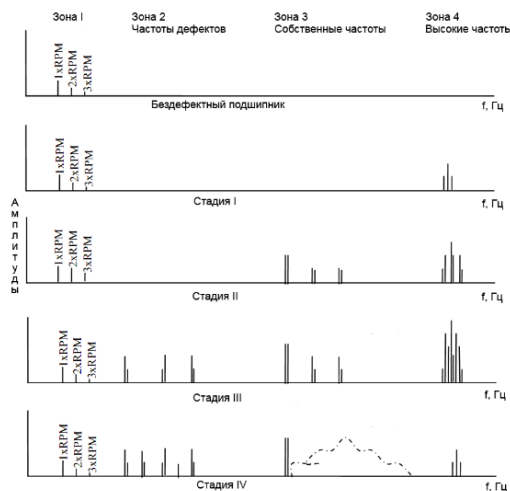


Рисунок 1. Зміна спектральних характеристик вібросигналу підшипника кочення із розвитком дефекту [2]

Нормальний підшипник або підшипник без дефектів не відображає жодних частот у спектрі, за винятком тих, що пов'язані з обертом ротора та його дефектами.

На першому етапі зародження дефекту з'являються високочастотні компоненти в ультразвуковому діапазоні. Візуальний контроль підшипника на цьому етапі може не виявити жодних ідентифікованих дефектів.

На наступному етапі розвитку дефекту з'являються компоненти із власними частотами підшипника. При огляді підшипника з'являються перші ознаки дефектів. У зонах 3 та 4 помітний ріст амплітуд частот.

З появою розвиненого дефекту у спектрі вібросигналу з'являються характеричні частоти підшипника. Гармоніки цих частот можуть з'являтися в залежності від кількості та розповсюдження дефектів по доріжках кочення. Частоти гармонік можуть бути модульовані частотою обертання ротора або з'являтися бічні частоти. У зоні 4 амплітуди продовжать зростати.

Остання стадія розвитку дефекту, після якої відбувається руйнування підшипника супроводжується появою великої кількості модульованих характеричних частот підшипника та їх гармонік, що свідчить про те, що дефекти поширилися по всіх доріжках. Частоти гармонік замінюються випадковим шумом. У зоні 4 амплітуди різко зменшуються з наступним значущим збільшенням перед моментом руйнування.

Існує багато методів аналізу вібрацій підшипників. Вони всі розробляються з двома основними цілями: відокремити сигнал підшипника від інших компонент та мінімізувати шум, який може замаскувати сигнал підшипника, особливо на ранніх етапах розвитку дефекту, і ідентифікувати стан підшипника, розрізнити нормальні та дефектні підшипники, вказувати на дефектні компоненти.

Потреба в ефективному обслуговуванні та безпечному функціонуванні підшипників призвела до розробки широкого спектру методів діагностичного контролю технічного стану підшипників на основі вейвлет-аналізу. У цих методах використання вейвлетів при обробці вібросигналів підшипників кочення можна розділити на два напрямки: застосування порогової вейвлет-обробки для очищення сигналів від шуму та використання вейвлет-аналізу для виділення характерних дефектних ознак із вібросигналу.

Алгоритми порогової вейвлет-обробки дозволяють виділити слабкі імпульсні компоненти в початковому неочищеному сигналі [23]. Для ефективної роботи потрібно вирішити дві задачі. По-перше, обрати вейвлет, за допомогою якого проводиться вейвлет-розклад сигналу. По-друге, вибрати відповідний пороговий рівень, який відсікав би шумову компоненту і залишав в очищеному сигналі імпульсні ознаки дефекту.

Серед існуючих вейвлет-функцій, які використовуються в неперервному вейвлет-аналізі, вейвлет Морле та вейвлет Мексиканська шапка найбільше схожі за формою на імпульсні компоненти нестационарних сигналів, що робить їх найбільш відповідними засобами аналізу такого типу сигналів [24].

Найбільш популярним вейвлетом для обробки вібросигналів підшипників є вейвлет Морле, форма якого схожа на форму імпульсів, що виникають при проходженні елемента кочення через зону дефекту.

При виборі аналізуючого вейвлета для фільтрації сигналів було віддано перевагу вейвлету Морле, який має вузький образ Фур'є. Наявність домінуючої частоти дозволяє змінювати вибірковість вейвлета Морле в частотній області.

Крім того, в якості аналізуючого був обраний комплексний тип вейвлета Морле. Його перетворення Фур'є дорівнює нулю для від'ємних частот, що дозволяє розділити фазові та амплітудні компоненти сигналу при виконанні вейвлет-перетворення.

В часовому домені комплексний вейвлет Морле представляє собою комплексну експоненту, модульовану функцією Гаусса:

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-\sigma^2 t^2} e^{i2\pi f_0 t}, \quad (2)$$

де  $\sigma$  та  $f_0$  – параметри вейвлета, що визначають його форму.

В частотній області вейвлет Морле має форму вікна Гаусса з центральною частотою  $f_0$  і шириною  $\sigma$ :

$$\hat{\psi}(f) = \hat{\psi}^*(f) = e^{-\frac{\pi^2}{\sigma^2}(f-f_0)^2}, \quad (3)$$

де  $\hat{\psi}(t)$  – перетворення Фур'є вейвлета Морле;  
 $f_0$  – центральна частота аналізуючого вейвлета;  
 $\sigma$  – ширина аналізованого діапазону частот;  
 \* – позначає комплексне спряження.

Нехай вейвлет Морле  $\psi(t)$  є функцією-вікном з радіусом  $\delta_t$ . Тоді кожен дочірній вейвлет на масштабі  $a$  матиме радіус вікна, рівний  $\delta_t a$ .

Отже, кількість точок з країв сигналу, які мають спотворений характер, може бути визначена за наступним виразом:

$$n = \delta_t a \cdot f_d, \quad (4)$$

де  $f_d$  – частота дискретизації сигналу;  
 $\delta_t$  – радіус вікна материнського вейвлета в часовому домені;  
 $a$  – параметр масштабу.

Оскільки вейвлет Морле є комплексною експонентою, яку модулює функція Гаусса (2), його ширина в часовому домені може бути визначена за допомогою правила трьох сигм як:

$$\delta_t = \frac{3}{\sigma\sqrt{2}}, \quad (5)$$

де  $\sigma$  – параметр материнського вейвлета, що характеризує в частотній області ширину аналізованого діапазону частот.

При аналізі сигналів слід також враховувати той факт, що зі зменшенням кількості точок після відсічення області, що містить крайові ефекти, зменшується роздільна здатність по частоті для спектра вейвлет-перетворення:

$$\Delta f = \frac{f_d}{(N - 2 * n)}, \quad (6)$$

де  $N$  – кількість відліків сигналу;  
 $f_s$  – частота дискретизації сигналу;  
 $n$  – довжина області крайових ефектів.

Вивчимо вібросигнал бездефектного підшипника кочення, фрагмент якого наведено на рис. 2 [2].

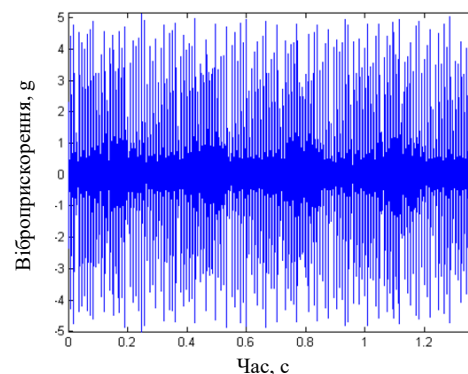


Рисунок 2. Вібросигнал бездефектного підшипника кочення [2]

Спектр необробленого сигналу (рис. 3 [2]) вказує на характерну частоту перекошування елементів кочення по зовнішній обоймі. Однак тестовий підшипник не має дефектів на зовнішній доріжці кочення.

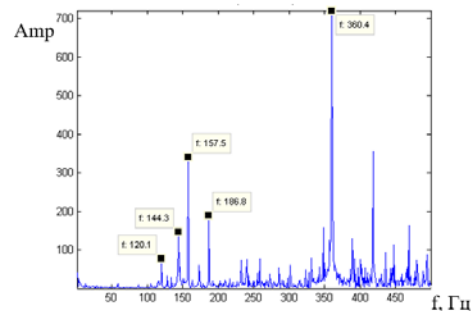


Рисунок 3. Спектр необробленого вібросигналу бездефектного підшипника [2]

Тепер розглянемо результат обробки цього сигналу за допомогою розробленого методу на основі вейвлет-аналізу (рис. 4 [2]).

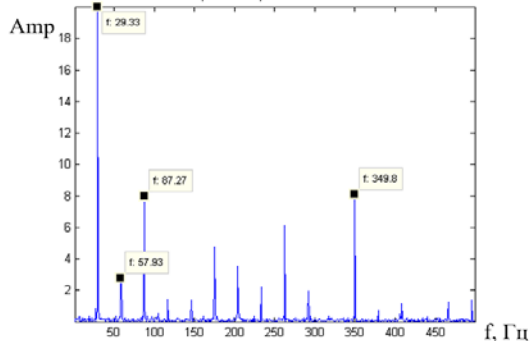


Рисунок 4. Спектр вібросигналу без дефектів підшипника, обробленого за допомогою вейвлет-аналізу [2]

Як видно з рисунку, в результаті обробки ми не бачимо частоту перекочування елементів кочення по зовнішній обіймі в спектрі, і при цьому можна отримати додаткову інформацію про стан підшипника.

Як можна помітити, у спектрі присутні гармоніки частоти обертання ротора (від першої до дванадцятої) з високими амплітудами, що може свідчити про ослаблення механічних з'єднань і може вказувати на наявність збільшених внутрішніх зазорів.

### Висновки

Результати дослідження свідчать, що застосування вейвлет-фільтрації для аналізу вібраційних сигналів підвищує швидкість та надійність постановки діагнозу. Крім того, отримані результати дозволяють зробити висновок про універсальність запропонованого методу та можливість його ефективного використання для аналізу інших типів нестаціонарних сигналів з метою ідентифікації дефектів обладнання.

Таким чином, для більш якісного виділення характерних діагностичних частот, що відповідають певному типу дефекту підшипників кочення, використовувався розроблений метод на основі неперервного вейвлет-аналізу. Експериментальні дослідження продемонстрували його високу ефективність у виділенні характеристичних частот підшипників на ранніх стадіях розвитку дефекту.

### Список літератури

1. Кіпріч, Т. В. Методи та моделі запобігання помпажним явищам в системі керування газотурбінного двигуна [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.03 / Т.В. Кіпріч. – Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2008. – 19 с.
2. Юр, Т. В. Модели и методы спектрального анализа технического состояния узлов газотурбинных двигателей [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 01.05.02 / Т.В. Юр ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки.

– Харків, 2012. – 19 с.

3. Hamrock Bernard J. Rolling-element bearings [Text] / Bernard J. Hamrock, William J. Anderson. – NASA-Langley, 1983. – 57 p.

4. Федорончак, Т.В. Диагностирование технического состояния подшипников качения [Текст] / Т.В. Федорончак, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Авіаційно – космічна техніка та технологія. – 2009. – №7. – С.166-170.

5. Лянзберг, В.П. Балансировка. Центровка валов. Диагностика подшипников качения. Диагностика электродвигателей [Текст] / В.П. Лянзберг, В.И. Харченко, В.Г. Атаманюк // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2006. – №1. – С. 34–36.

6. Halme, J. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics [Text] / J. Halme, P. Andersson // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2010. – Vol. 224, No. 4. – P. 377–393. doi:10.1243/13506501JET656

7. Юр, Т.В. Модель оцінки технічного стану вузлів ГТД за параметрами вібрації з використанням вейвлет-перетворення [Текст] / Т.В. Юр, В.М. Харитонов, В.И. Дубровин. – Авіаційно – космічна техніка та технологія. – 2013. – №10/107. – С.177-182.

8. Borucki, S. Condition Monitoring of Rotary Machines [Text] / S. Borucki, A. Cichoń, T. Boczar // Przegląd Elektrotechniczny. – 2010. – № 11b. – P. 182–186.

9. Дубровин, В. И. Определение диагностических признаков состояния подшипников качения при помощи вейвлет-анализа [Текст] : збірка наукових праць міжнародної наукової конференції ISDMCI'2008 у 3 т. Т. 3. (частина 1) Теоретичні і прикладні аспекти систем прийняття рішень / В.И. Дубровин, Т.В. Федорончак. –Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2008. – С. 113–116.

10. Дубровин, В. И. Диагностика дефектов подшипников качения при помощи вейвлет-преобразования [Текст] / В. И. Дубровин, Т. В. Федорончак // Вісник двигунобудування. – 2008. – № 2. – С. 132–135.

11. Torbatian, M. Bearing fault detection using level-dependent noise reduction technique [Text] : proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology / M. Torbatian, M. H. Kahaei, J. Poshtan // IEEE, 2003. – 4 p. doi: 10.1088/1361-6501/ad704b

12. Thuillard, Marc. A review of wavelet networks, wavenets, fuzzy wavenets and their applications [Text] : proceedings of the ESIT 2000, 14–15 September 2000 / Marc Thuillard //Aachen, Germany, 2000. – 12 p.

13. Jian-Da, W. Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network [Text] / W. Jian – Da, Shiddiq Chiu-Hong L., // Expert Systems with Applications. – 2008. – № 3. – P. 1200–1213. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.021

14. Detecting mechanical failures inducing periodical shocks by wavelet multiresolution analysis. Application to

rolling bearings faults diagnosis [Text] / A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui, L. Chaabi // *Mechanika*. – 2006. – №2 (58). – P. 44–51.

15. Bearing Faults Diagnosis Using Discrete Wavelets and Artificial Intelligence Approaches [Text]: proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications / J. Khelil, K. Khelil, M. Ramdani, N. Boutasseta // *IEEE Xplore*, 2019. – P. 1–7. doi: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182516

16. Shi, D.F. Defect detection for bearings using envelope spectra of wavelet transform [Text] // D.F. Shi, W.J. Wang, L.S. Qu // *Journal of vibration and acoustics*. – 2006. – Vol. 126, Is. 4. – P. 567–573. doi: 10.1115/1.1804995

17. Al-Raheem. Rolling element bearing fault diagnosis using Laplace-wavelet envelope power spectrum [Text] / Khalid F. Al-Raheem, Asok Roy, K. P. Ramachandran, D. K. Harrison, Steven Grainger // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. – 2007. – Vol. 2007, Is. 1. – 14 p. doi: 10.1155/2007/73629

18. Rai, V. K. Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert–Huang transform [Text] // V. K. Rai, A.R. Mohanty // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2007. – Vol. 21 (6). – P. 2607–2615. doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.004

19. Юр Т.В., Харитонов В.Н., Дубровин В.И., Метод анализа технического состояния подшипников качения, основанный на использовании вейвлет-математики [Текст] // *Авіаційно – космічна техніка та технологія*, 2010, №10(77). – С. 187–191.

20. Юр, Т. В. Модель диагностирования узлов газотурбинных двигателей с применением вейвлет-преобразования и S-дискриминанта [Текст] / Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. – 2011. – №2 (25). – С. 60–64.

21. Твердохліб Ю. В. Методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06 / Твердохліб Юлія Володимирівна ; Харків. нац. екон. ун-т ім. Семена Кузнеця. – Харків, 2018. – 20 с.

22. Пат. 90102 Україна, МПК6 G01R 23/16. Спосіб визначення оптимального вейвлету для аналізу сигналів на основі дослідження його амплітудно-частотної характеристики [Текст] / В. І. Дубровін, Ю. В. Твердохліб; заявник и патентовласник: Запорізький національний технічний університет; заявл. 20.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. No 9., 3 с.

23. Basics of vibration monitoring for fault detection and process control [Text] : proceedings of the 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing, 2–6 June, 2003 / Wilfried Reimche, Ulrich Südmersen, Oliver Pietsch, Christian Scheer, Friedrich-Wilhelm Bach // *Rio de Janeiro, Brasil*, 2003. – P. 2–6.

24. Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement [Text] / Wensheng Su, Fengtao Wang, Hong Zhu, Zhixin Zhang, Zhenggang Guo // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2010. – Vol. 24, iss. 5. – P. 1458–1472. doi:10.1016/j.ymssp.2009.11.011

Одержано 25.09.2024

## DIAGNOSIS OF ROLLING BEARING DEFECTS BASED ON WAVELET ANALYSIS

- Dubrovin V. Candidate of Technical Sciences, Professor of the Software Tools Department of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vdubrovin@gmail.com*, ORCID: 0 000-0002-0848-8202
- Deineha L. Senior Lecturer of the Software Tools Department of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: deynega.larisa@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-0304-4327
- Pavlenko K. Student of the Software Tools Department of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: pavlenkokirya02@gmail.com*
- Tarasova Yu. Candidate of Technical Sciences, Web Developer at IT-company “Freshcode”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: julia.tverdohleb@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-2814-7907
- Fedoronchak T. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Software Tools Department of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: t.fedoronchak@gmail.com*, ORCID: 0000-0001-6238-1177

**Purpose.** Development and improvement of a method for analyzing vibration signals from rolling bearings based on wavelet analysis for the detection and identification of equipment defects.



**Research methods.** Wavelet analysis was employed for processing vibration signals from rolling bearings. Threshold wavelet filtering was applied to highlight weak impulse components in the signals, and Morlet wavelet was used to ensure effective filtration.

**Results.** The research results indicate that the proposed method, utilizing wavelet filtering, enhances the speed and reliability of vibration diagnostics for bearings. This allows for the efficient extraction of characteristic frequencies associated with various types of rolling bearing defects.

In comparison with other signal analysis methods, the use of the developed method based on continuous wavelet analysis has proven to be particularly effective in extracting characteristic diagnostic frequencies. This method not only allows for the identification of specific types of defects in rolling bearings but also ensures universality, enabling its successful application for analyzing other types of non-stationary signals.

Experimental studies have confirmed the high efficiency of the developed method, especially in the early stages of defect development. The application of this method is evident not only in its ability to effectively highlight the characteristic frequencies of bearings but also in its capacity to conduct signal analysis for the identification of equipment defects as a whole. This makes the proposed method a promising and versatile tool for the diagnosis and monitoring of the condition of technical systems.

**Scientific novelty.** Application of the proposed method for processing vibration signals from rolling bearings based on wavelet analysis to improve the effectiveness of defect detection and identification in equipment.

**Practical value.** The developed method can be applied in the industrial sector for the analysis and diagnostics of rolling bearings in equipment. It enables the timely detection of defects, reduces the risk of equipment failure, and lowers operational maintenance costs. Thus, this method has practical value in enhancing the reliability and productivity of industrial equipment.

**Key words:** vibration signals, rolling bearings, wavelet analysis, equipment defects, fault diagnostics, wavelet filtering.

## References

1. Keeprich, T. V. (2008). Metody ta modeli zapobihannia pompazhnyim yavlyshcham v systemi keruvannia hazoturbinnoho dvyhuna [Methods and models of surge effects protection in the gas-turbine control system]. Kharkiv, 19.
2. Yur, T. V. (2012). Modeli i metody spektralnoho analiza tekhnicheskoho sostoiannya uzlov hazoturbinykh dvigatelei [Models and methods of spectral analysis of gas-turbine engine elements technical state]. Kharkiv. – 19.
3. Hamrock, Bernard J., Anderson, William J. (1983). Rolling-element bearings. NASA-Langley, 57.
4. Fedoronchak, T. V., Kharitonov, V. N., Dubrovin, V.I. (2009). Diahnostirovanie tekhnicheskoho sostoiannya podshypnikov kacheniya [Diagnosis of the technical condition of rolling bearings]. Aviation-Spacecraft Engineering and Technology, 7, 166–170.
5. Lyanzberg, V. P. Kharchenko, V. I., Atamanyuk, V. G. (2006). Balansirovka. Tsentrovka valov. Diahnostika podshypnikov kacheniya. Diahnostika elektrodvigatelei [Balancing. Shaft alignment. Diagnosis of rolling bearings. Diagnosis of electric motors]. Plumbing. Heating. Air conditioning, 1, 34–36.
6. Halme, J. Andersson, P. (2010) Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 224 (4), 377–393. doi:10.1243/13506501JET656
7. Yur, T. V., Kharytonov, V. N., Dubrovin (2013). Model otsinky tekhnicheskoho stanu vuzliv HTD za parametramy vibratsii z vykorystanniam veivlet-peretvorennia [Model for assessing the technical condition of gas turbine engine units based on vibration parameters using wavelet transform]. Aviation and space technology, 10/107, 177–182.
8. Borucki, S., Cichoń, A., Boczar, T. (2010). Condition Monitoring of Rotary Machines, Przegląd Elektrotechniczny, 11b, 182–186.
9. Dubrovin, V. I., Fedoronchak, T. V. (2008). Opredelenie diahnosticheskikh priznakov sostoiannya podshypnikov kacheniya pri pomoshchi veivlet-analiza [Determination of diagnostic signs of the state of rolling bearings using wavelet analysis]. Intelligent Decision-Making Systems and Problems of Computational Intelligence. International Scientific Conference ISDMCI'2008. Collection of scientific works in three volumes. Volume 3 (part 1) Theoretical and applied aspects of decision-making systems, 113–116.
10. Dubrovin, V. I., Fedoronchak, T. V. (2008). Diahnostika defektov podshypnikov kacheniya pri pomoshchi veivlet-preobrazovaniya [Diagnosis of rolling bearing defects using wavelet transformation], Bulletin of Engine Building, 2, 132–135.
11. Torbatian, M., Kahaei, M. H., Poshtan, J. (2003). Bearing fault detection using level-dependent noise reduction technique IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 4.
12. Thuillard, Marc (2000). A review of wavelet networks, wavenets, fuzzy wavenets and their applications. ESIT 2000, 12
13. Jian-Da, W., Chiu-Hong, L. Shiddiq (2008).

Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network. *Expert Systems with Applications*, 3, 1200–1213. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.021

14. Djebala, A., Ouelaa, N., Hamzaoui, N., Chaabi, L. (2006). Detecting mechanical failures inducing periodical shocks by wavelet multiresolution analysis. Application to rolling bearings faults diagnosis, 2 (58), 44–51.

15. Khelil, J., Khelil, K., Ramdani, M., Boutasseta, N. (2019) Bearing Faults Diagnosis Using Discrete Wavelets and Artificial Intelligence Approaches. 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications, 17. doi: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182516

16. Shi, D.F., Wang, W.J., Qu, L.S. (2006) Defect detection for bearings using envelope spectra of wavelet transform. *Journal of vibration and acoustics*, 126 (4), 567–573.

17. Khalid F. Al-Raheem. Asok, Roy, Ramachandran, K. P., Harrison, D. K., Grainger, S. (2007). Rolling element bearing fault diagnosis using Laplace-wavelet envelope power spectrum. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2007(1), 14 doi: 10.1155/2007/73629

18. Rai, V. K., Mohanty, A.R. (2007) Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert–Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (6), 2607–2615. doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.004

19. Yur, T.V., Kharyitonov, V.N., Dubrovin, V.I. (2010) Metod analiza tekhnicheskoho sostoianiya podshyptikov kacheniya, osnovannyi na ispolzovanii veivlet-matematiki [Method for analyzing the technical

condition of rolling bearings based on wavelet mathematics]. *Aviation and space technology*, 10(77), 187–191.

20. Yur, T.V., Kharitonov, V.N., Dubrovin V.I. (2011) Model diahnostirovaniia uzlov hazoturbinykh dvigatelei s primeneniem veivlet-preobrazovaniia i S-diskriminanta [Model of diagnosing gas turbine engine units using wavelet transform and S-discriminant]. *Radioelectronics. Informatics. Management*, 2 (25), 60–64.

21. Tverdokhlib, Yu. V. (2018). Metody ta informatsiina tekhnolohiia kompleksnoho otsiniuvannia parametriv veivlet-peretvorennia nestatsionarnykh syhnaliv [Methods and information technology of complex estimation of wavelet transform parameters of a non-stationary signals]. Kharkiv, 20.

22. Dubrovin, V.I., Tverdokhlib Yu.V. (2014). Method for determining the optimal wavelet for signal analysis based on the study of its amplitude-frequency characteristic. Patent of Ukraine, IPC 6 G01R 23/16. № 90102; declared 20.12.13; published 12.05.14, № 9.

23. Reimche, Wilfried, Südmersen, Ulrich, Pietsch, Oliver, Scheer, Christian, Bach, Friedrich-Wilhelm (2003). Basics of vibration monitoring for fault detection and process control / Wilfried Reimch. 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing, 10.

24. Su, Wensheng, Wang, Fengtao, Zhu, Hong, Zhang, Zhixin, Guo, Zhenggang (2010). Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 (5), 1458–1472. doi:10.1016/j.ymssp.2009.11.011