

**КРИТЕРІЙ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ ВІД ПОПЕРЕЧНОЇ  
ТРИЩИНИ РЕЙКИ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕПЕРЕРВНОГО  
ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ**

In this paper the approach to detecting defects in rails based on modern signal processing tool – continuous wavelet transform (CWT) is discussed. The basic criteria for detecting a signal from the transverse crack in the head of rail are defined.

**Keywords:** *transverse crack, CWT, wavelet coefficients.*

Розглянуто підхід до виявлення дефектів залізничних рейок на основі сучасного інструменту обробки сигналів – неперервного вейвлет-перетворення (НВП). Визначено основні критерії виявлення сигналу від поперечної тріщини в головці рейки.

**Ключові слова:** *поперечна тріщина, НВП, вейвлет-коефіцієнти.*

Діагностика технічного стану об'єктів забезпечує їх безпечну експлуатацію та вчасне виявлення дефектів. Особливо це актуально у процесі діагностування об'єктів, дефекти яких можуть стати причиною значних матеріальних витрат або людських жертв. До таких об'єктів відносять залізничні рейки.

Тепер для швидкісної діагностики рейок використовують ультразвукові та магнітні вагони-дефектоскопи, які доповнюють один одного. Зокрема, магнітні дефектоскопи краще виявляють поперечну тріщину в головці рейки, яка є особливо небезпечною, оскільки може призводити до злому рейки під рухомим поїздом [1].

Найважливіше питання як при магнітному, так і при ультразвуковому методах швидкісного контролю рейок – це виділення інформації про дефекти з дефектоскопічного сигналу, який записано під час руху вагона-дефектоскопа. Актуальність задач розробки методів та алгоритмів комп'ютерної обробки сигналів рейкової дефектоскопії зумовлена тим, що на цей час процес аналізу цих сигналів здійснюється в напівручному режимі, на основі візуальних експертних оцінок. Для підвищення ефективності роботи оператора необхідно здійснити автоматизацію аналізу сигналів з виділенням образів тих сигналів, які з найбільшою вірогідністю походять від небезпечних дефектів.

**Основи теорії НВП.** Загальноприйнятим підходом до аналізу різноманітних сигналів  $s(t)$  є їхнє подання у вигляді підбраної суми простих складових – базисних функцій  $\psi_k(t)$ , помножених на коефіцієнти  $C_k$ :

$$s(t) = \sum_k C_k \psi_k(t). \quad (1)$$

Оскільки базисні функції  $\psi_k(t)$  зафіксовані як функції визначеного типу, то лише коефіцієнти  $C_k$  містять інформацію про конкретний сигнал. Отже, можна вести мову про можливість подання довільних сигналів на основі рядів з різними базисними функціями.

Базисними функціями вейвлет-перетворення можуть бути різноманітні функції, в тому числі схожі на модульовані імпульсами синусоїди, функції зі стрибками рівня і т.д. Це забезпечує легке подання сигналів з локальними стрибками (а саме такими є сигнали від дефектів залізничної колії) наборами вейвлетів того чи іншого типу. Майже всі вейвлети не мають аналітичного подання у вигляді однієї формули і можуть задаватись ітераційним виразом [2].

Для здійснення НВП необхідна наявність функції  $\psi(t)$  з нульовим значенням інтегралу:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (2)$$

яка визначає деталі сигналу та утворює деталізуючі коефіцієнти.

Ця функція створюється на основі базової функції  $\psi_0(t)$ , яка, як і  $\psi(t)$ , визначає тип вейвлету. Базова вейвлет-функція повинна забезпечувати виконання двох основних операцій:

- зміщення по осі часу  $t - \psi_0(t - b)$  при  $b \in R$ ;
- масштабування  $- a^{-1/2} \cdot \psi_0\left(\frac{t}{a}\right)$  при  $a > 0$  та  $a \in R^+ - \{0\}$ .

Параметр  $a$  задає ширину цього пакету, а  $b$  – його розміщення. Наступний вираз задає одразу дві властивості функції  $\psi(t)$ :

$$\psi(t) = a^{-1/2} \cdot \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (3)$$

З цієї формули випливає, що для заданих  $a$  та  $b$  функція  $\psi(t)$  і є вейвлетом.

Результатом НВП сигналу є обчислення вейвлет-коефіцієнтів згідно з такою формулою:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot a^{-1/2} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

тобто, вейвлет-коефіцієнти  $C(a, b)$  визначаються інтегральним значенням скалярного добутку сигналу  $s(t)$  на вейвлет-функцію заданого виду.

**Аналіз дефектограми із сигналом від поперечної тріщини рейки за допомогою НВП та визначення основних критеріїв виявлення цього дефекту.** Всі дослідження, які подано нижче, здійснені в пакеті прикладних програм Wavelet

Toolbox, системи комп'ютерної математики Matlab.

Як материнську функцію НВП вибрано вейвлет (рис. 1), адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки. Процес створення цього вейвлету описано в [3].

На рис. 2 зображено фрагмент дефектоскопічного сигналу з наявним у ньому сигналом від поперечної тріщини в головці рейки. На краях цього фрагменту зображено сигнали від рейкових стиків, а вздовж усієї його довжини – сигнали від рейкових підкладок (схожі на фоновий шум).

Тепер спробуємо проаналізувати вищезазначений фрагмент (рис. 2) за допомогою НВП з використанням адаптованого вейвлету (рис. 1). Результатом проведення цього аналізу є побудова скейлограми (рис. 3), яка показує значення коефі-

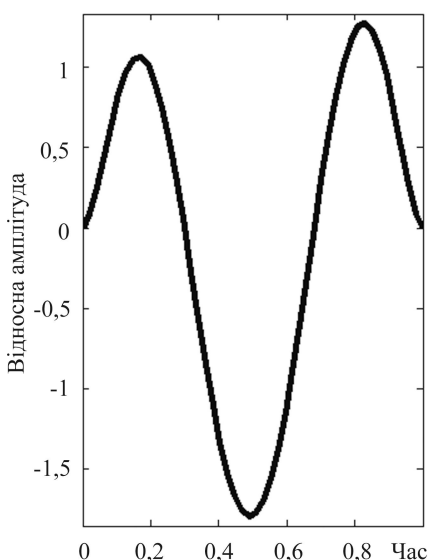


Рис. 1. Вейвлет, адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки.

цієнтів вейвлет-перетворення в площині масштаб–відліки. Чим більше значення цих вейвлет-коефіцієнтів, тим темнішим кольором вони відображені на скейлограмі. В місці, де розташований дефект, чітко виділяється вертикальна лінія темного кольору, яка свідчить про наявність у цій точці осі відліків – сигналу, форма якого дуже схожа на адаптований вейвлет.

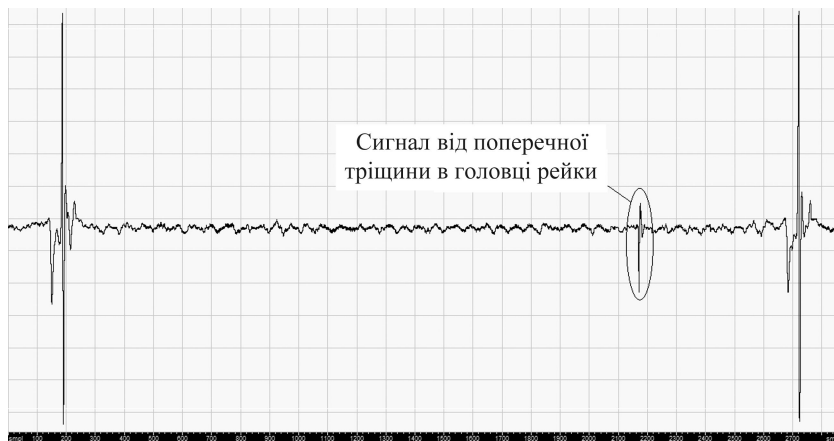


Рис. 2. Фрагмент дефектоскопічного сигналу з поперечною тріщиною рейки по коду 21.2, отриманий під час заїзду Львів–Сянки –Чоп 06.11.2009 р. (36 km; пікет – 6; швидкість 47 km/h).

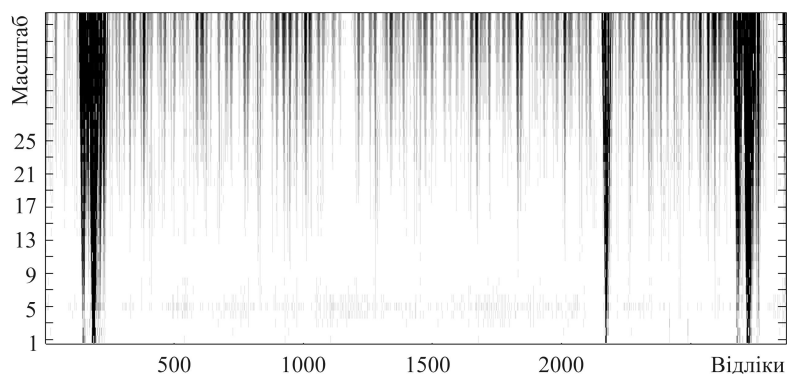


Рис. 3. Скейлограма дефектоскопічного сигналу, зображеного на рис. 2, отримана в процесі виконання НВП з використанням вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від поперечної тріщини.

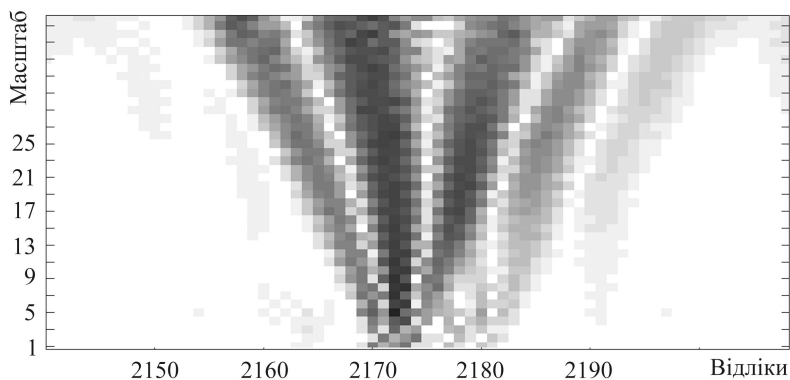


Рис. 4. Скейлограма дефектоскопічного сигналу, зображеного на рис. 2, в місці, де розміщений сигнал від поперечної тріщини.

Тепер збільшимо скейлограму в області сигналу від поперечної тріщини (рис. 4). Для кращої локалізації сигналу від дефекту по осі відліків необхідно, щоб значення вейвлет-коефіцієнтів (від дефекту) в області низьких масштабів були якомога більші за величиною. З рис. 4 видно, що коефіцієнти вейвлет-перетворення мають максимальне значення на 2172 відліку, який і можна вважати координатою розміщення дефекту.

Для того, щоб проаналізувати, який масштаб (чи масштаби) варто вибрати як критерій наявності дефекту, необхідно розглянути залежність значень вейвлет-коефіцієнтів від масштабу в місці розташування розглянутого дефекту. З графіка, зображеного на рис. 5, видно, що вейвлет-коефіцієнти мають своє максимальне значення в діапазоні масштабів від 8 до 21.

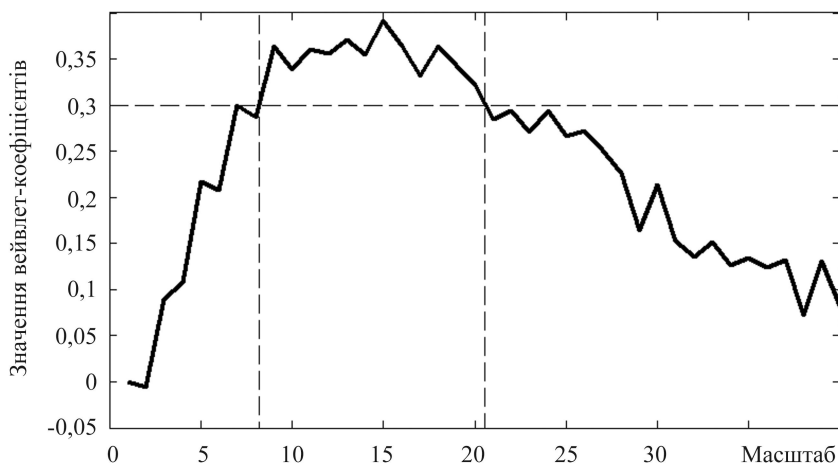


Рис. 5. Залежність величини вейвлет-коефіцієнтів від масштабу в місці розташування сигналу від поперечної тріщини (на 2172 відліку).

Щоб порівняти величину цих коефіцієнтів з коефіцієнтами, отриманими від шпальних підкладок, побудуємо графік значень вейвлет-коефіцієнтів в околі сигналу від поперечної тріщини, приблизно в середині встановленого діапазону (рис. 6). В місці, де міститься дефект, коефіцієнти НВП досягають величини в 16 разів більшої за амплітуду коефіцієнтів, отриманих від шпальних підкладок ( $W_{\Pi}$ ), а це дає змогу вести мову про присутність (чи відсутність) дефекту, визначивши відповідний поріг на величину цих вейвлет-коефіцієнтів.

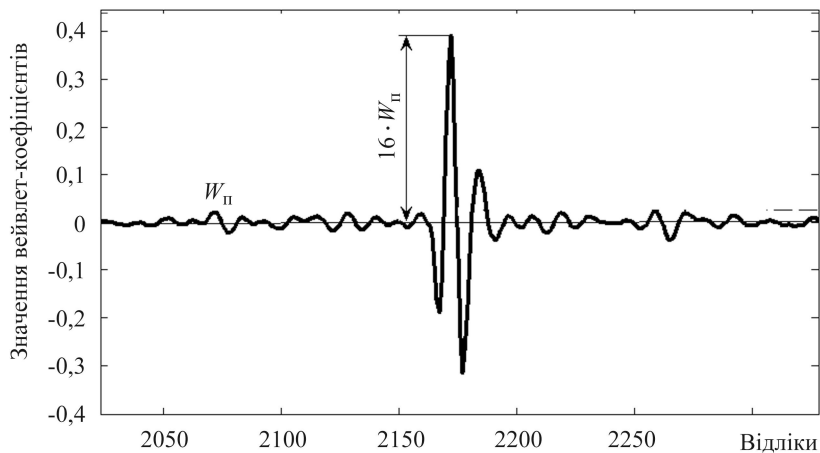


Рис. 6. Величини вейвлет-коефіцієнтів (на 15 масштабі) в околі сигналу від поперечної тріщини.

Оскільки сигнал від поперечної тріщини в головці рейки на рис. 2 достатньо великої амплітуди, то його виявлення не зумовить жодних проблем і для оператора вагону-дефектоскопу. Тому, цілком логічно, виникає запитання можливості застосування НВП там, де оператор є безсилим. Відповідь на це запитання може дати аналіз сигналів (від цього дефекту), які мають значно меншу амплітуду. Хоча оператор вагону-дефектоскопу не зобов'язаний реєструвати сигнали, які не перевищують рівень виявлення, тобто такої величини, при якій амплітуда глобального від'ємного імпульсу дефекту не перевищує трьох амплітуд сигналів від шпальних підкладок, їх реєстрація значно покращить якість його роботи. Виявлення таких сигналів дасть змогу здійснювати моніторинг розвитку дефектів, який виведе дефектоскопію залізничної колії на якісно новий етап її розвитку. Такий моніторинг не завжди під силу навіть досвідченим операторам, оскільки людський чинник у вигляді втоми під час перегляду довгих дефектограм відіграє визначальне значення при дефектоскопії розвинених дефектів, вже не зазначаючи про виявлення дефектів на початкових стадіях їх зародження. Щоб дати відповідь на поставлене запитання, сигнал від поперечної тріщини було зменшено до величини, нижчої за рівень виявлення (рис. 7).

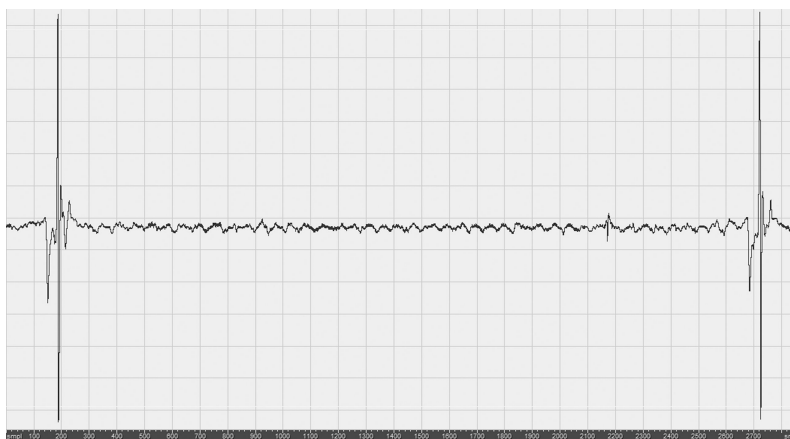


Рис. 7. Дефектоскопічний сигнал, зображений на рис. 2, з поперечною тріщиною рейки по коду 21.2, амплітуда якої була зменшена до рівня виявлення цього дефекту.

Здійснивши НВП сигналу, зображеного на рис. 7, видно, що амплітуда вейвлет-коефіцієнтів від дефекту на 15 масштабі (рис. 8) зменшилась (порівняно з рис. 6), що зумовлено зменшенням сигналу від поперечної тріщини.

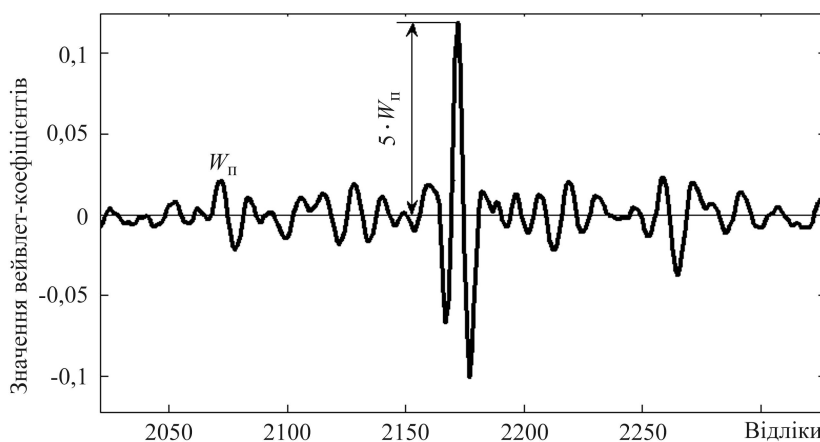


Рис. 8. Величини вейвлет-коефіцієнтів (на 15 масштабі) в околі сигналу від поперечної тріщини, амплітуда якого менша за рівень виявлення цього дефекту.

Тепер ця амплітуда приблизно в 5 разів більша за амплітуду коефіцієнтів, отриманих від шпальних підкладок. Цей результат дає змогу стверджувати про можливість виявлення сигналів від дефектів (починаючи із стадії їх зародження) за допомогою НВП, що дасть змогу здійснювати моніторинг їх розвитку.

### **ВИСНОВКИ**

Можливість використання НВП для автоматичного аналізу дефектоскопічних сигналів, із поданням на розгляд оператора вагону-дефектоскопу тих частин дефектограми, які з найбільшою імовірністю походять від дефекту типу поперечної тріщини, визначається такими критеріями виявлення цього дефекту: вдало підібрана материнська функція для НВП; вибрано такі масштаби НВП (пропонується в межах від 8 до 21), за якими, з найбільшою вірогідністю, можна стверджувати про наявність чи відсутність дефекту; оптимально підібрано пороги на величину вейвлет-коефіцієнтів по кожному з масштабів. Вищенаведені критерії справедливі і для інших дефектів (за винятком рекомендованого діапазону масштабів, який залежить від форми сигналу конкретного дефекту). Оптимальне визначення критеріїв виявлення дефектів за допомогою НВП відкриває можливість залучення до цього процесу такого засобу, як штучні нейронні мережі [4].

1. *Особливості виявлення дефектів рейок в умовах Львівської залізниці / В. О. Нічога, М. В. Сім'яновський, І. С. Кучма, Г. Р. Трохим // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 34 (110). – С. 42–48.*
2. *Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Спец. справ. – СПб.: Издательский дом “Питер”, 2002 – 608 с.*
3. *Нічога В., Ваццишин Л., Сторож І. Створення “материнської” вейвлет-функції та аналіз за її допомогою дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини рейок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 3. – С. 61–69.*
4. *Ваццишин Л., Нічога В., Сторож І. Штучні нейронні мережі, як засіб для розпізнавання дефектів залізничних рейок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 5. – С. 34–37.*

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка  
НАН України, Львів;  
Національний університет “Львівська політехніка”*

*Одержано  
15.01.2013*