

ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА СИГНАЛІВ У ПРОЦЕСІ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ РЕЙОК

The problem of diagnostic automation of the rail state is considered on the basis of analysis of experimental data, got by the monitoring apparatus of carriage-fault detector by magnetodynamics method. Diagnostics is a some steps process, at the beginning of which preliminary processing of fault detection signals is worked out and fragments of signals are picked out, which can correspond to defects, for their further research.

Розглянуто задачу автоматизації діагностики стану рейок на основі аналізу експериментальних даних, отриманих магнітодинамічним методом за допомогою моніторингової апаратури вагона-дефектоскопа. Діагностика є кількакроковим процесом, на початку якого проводиться попередня обробка сигналів дефектоскопії та виділяються фрагменти сигналів, що можуть відповідати дефектам, для їх подальшого дослідження.

Для діагностики стану рейок звичайно здійснюється аналіз сигналів дефектоскопії, які можуть бути отримані різними методами, зокрема, магнітодинамічним [1–4]. Необхідно спочатку виділити фрагменти сигналу, які потенційно можуть відповідати рейковим дефектам, провести їх порівняння з наявними зразками сигналів дефектних ділянок та здійснити остаточну класифікацію виділених фрагментів. Крім того, можливе також здійснення порівняння з попередніми сигналами, отриманими для цієї ж ділянки колії, з метою визначення динаміки зміни потенційних дефектів. Під час порівняння використовують довідкову інформацію про відомі типи дефектів (наприклад, № 21 – дефект типу “поперечна тріщина”) та особливості пов’язаних з ними сигналів; еталони дефектних сигналів на основі моделювання відповідних процесів їх формування [2, 3]; експериментальні зразки, раніше класифіковані для різних типів дефектів. В усіх цих випадках, в основному, використовують дефектоскопічний аналіз сигналів у ручному чи напівручному режимі (з обчисленням у діалоговому режимі деяких параметрів фрагменту сигналу) на основі візуальних експертних оцінок. Очевидно, що ефективність та продуктивність роботи оператора-експерта значно підвищиться при здійсненні повної чи часткової автоматизації діагностики стану рейок із застосуванням сучасних методів обробки сигналів.

Метою статті є представлення попереднього автоматизованого комп’ютерного аналізу експериментальних дефектоскопічних сигналів, отриманих магнітодинамічним методом, для подальшої ідентифікації фрагментів сигналів, що відповідають дефектам.

Постановка задачі та основні особливості сигналів дефектоскопії рейок.

У [3] стверджується, що можливості накопичення інформації про різні типи дефектів на основі експериментальних даних є більш обмеженими порівняно з результатами, отриманими на основі комп’ютерного моделювання. Однак експериментальні дані дають змогу отримати сигнали, адекватні наявним дефектам, прослідкувати за еволюцією сигналів у процесі розвитку дефекту, отримати статистичну інформацію для окремих груп дефектів, на основі яких використати методи розпізнавання із застосуванням нейронних мереж, нечіткої логіки тощо. Очевидно, що модельні сигнали не завжди можуть врахувати всі особливості сигналів, що відповідають дефектам, хоча й є доцільним використовувати поєднання цих методів, оскільки моделювання дає змогу сформуванню значно більшу різноманітність сигналів з різними типами дефектів, різними стадіями їх розвитку тощо.

Для дослідження були використані експериментальні сигнали, отримані магнітодинамічним методом з допомогою вагона-дефектоскопа, на основі яких здійснюється діагностика стану залізничних рейок. Ці сигнали отримують з допомогою моніторингової апаратури вагона-дефектоскопа – апаратно-програмного комплексу (АПК) “Дефектоскоп”, розробленого НКФ “Логіка”, м. Київ [5].

У процесі руху вагона-дефектоскопа на деякій ділянці колії експериментальні дані формуються у вигляді одного архівованого файлу. Після розархівування файлу з допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (теж розробленого НКФ “Логіка”) отримується файл з розширенням .xls (у форматі програми електронних таблиць EXCEL).

Файли даних містять значення відліків для кожної з двох рейок, а також деяку службову інформацію. Всі наступні числові дані відносяться до одного з експериментальних файлів 06280105.CSV, сформованого 28.01.2005 р. на ділянці колії Чернігів–Горностаївка (203776 відліків, довжина ділянки колії 2,037 км). Для інших файлів є кількісні відмінності для окремих фрагментів, але регулярні фрагменти мають якісно такий самий вигляд. Відліки сигналів від рейок прив’язані до координати з кроком 1 см. Приклад фрагменту сигналу наведений на рис. 1а, де n – номер відліку; $s[n]$ – нормоване значення сигналу ($-255 \leq s[n] \leq 255$). На цьому рис. 1 видно, що “фоною” складовою сигналу є коливання, зумовлені шпальними підкладками, до яких кріпляться рейки. Період цих коливань становить близько 50 відліків.

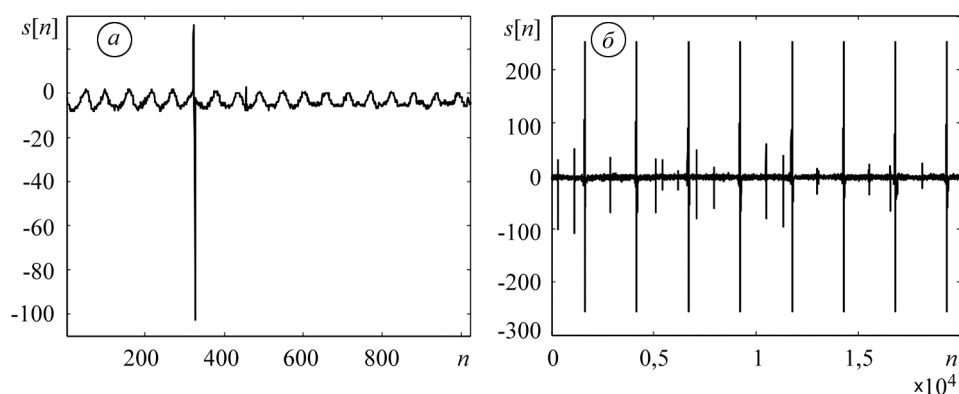


Рис. 1. Фрагменти експериментальних сигналів дефектоскопії рейок:
а – для 100 відліків; б – для 20000 відліків.

На рис. 1б відображено сигнал для 20000 відліків (відстань 200 м), на якому видно регулярні імпульси великої амплітуди (від -255 до 255), які зумовлені стиковими зазорами між відрізками рейок. Відстань між цими імпульсами становить близько 2540 відліків.

Попередню обробку експериментальних сигналів дефектоскопії рейок опишемо нижче.

Визначення загальних параметрів сигналів. До загальних параметрів сигналів можна віднести, наприклад, середнє значення сигналу, нижнє та верхнє порогові значення сигналу, перевищення яких визначає фрагменти сигналу, що відповідають можливим дефектам. Зокрема, для файлу, який розглядали, середні значення сигналів є відмінними від нуля і становлять для двох рейок $-3,5$ та $-4,6$.

На основі аналізу експериментальних даних вважають, що фрагмент сигналу потрібно розглядати як такий, що може відповідати дефекту, якщо його амплітудне значення (від’ємної полярності) становить $3a_n$, де a_n – середня амплітуда сигналів від підкладок. Для визначення фрагментів сигналів, що потенційно мо-

жуть відповідати дефектам, необхідно встановити межі, в яких знаходяться складові сигналу, що відповідають шпальним підкладкам. З цією метою весь діапазон можливих значень сигналу $(-255; 255)$ розділяється на деяку кількість рівнів (було задане значення 5000 – різниця між рівнями становила $\sim 0,1$) і для кожного рівня визначається відносна кількість відліків сигналу, які перевищують цей рівень, тобто будується функція $n_{ov}(lev)$. Очевидно, що ця функція є незростаючою, її графік зображено на рис. 2.

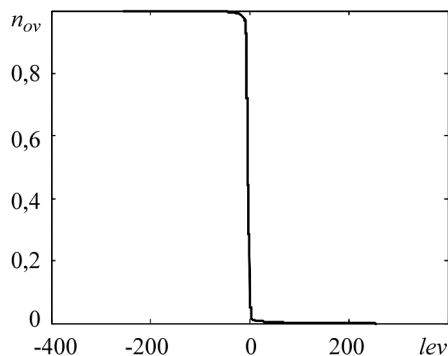


Рис. 2. Відносна кількість перевищень сигналом заданого рівня (lev – нормоване значення рівня сигналу; n_{ov} – відносна кількість відліків, які перевищують цей рівень)

На цьому графіку видно область швидкого спадання функції та дві області повільного зменшення. Перша область відповідає діапазону значень сигналу від шпальних підкладок. Для встановлення меж цієї області ($lev_{min}; lev_{max}$) задавали верхнє значення функції (0,85) та її нижнє значення (0,15). Відповідні значення рівнів були такі: $lev_{min} \approx -6$; $lev_{max} \approx 0,05$. Середнє значення цих величин $lev_{mean} = (lev_{min} + lev_{max}) / 2 \approx -2,98$. Сигнали від підкладок мають чітко виражений коливний характер, амплітуда цих коливань може бути оцінена значенням $lev_a = |lev_{max} - lev_{min}| / 2 \approx 3,03$.

Для виділених фрагментів сигналів, що відповідають потенційним дефектам, необхідно визначити деякі ознаки, на основі яких ці дефекти можна би було ідентифікувати. До таких ознак, зокрема, належать амплітуда, полярність, тривалість, кругість фронтів. Для дефекту № 21 до цих ознак додаються деякі більш деталізовані: відношення амплітуд центрального і бічних імпульсів, відносна тривалість імпульсів у групі тощо.

Виділення фрагментів сигналів від рейкових стиків та їх аналіз. Для визначення положення та ідентифікації всіх імпульсів з великою амплітудою фіксуються координати всіх максимумів, амплітуда яких перевищує 200. Для кожного з цих максимумів виділяється фрагмент сигналу по 50 відліків в обидва боки, тобто виділяється імпульс тривалістю 101 відлік, що відповідає відстані ~ 1 м. Оскільки при цьому кількість виділених імпульсів перевищує реальну кількість імпульсів (внаслідок того, що в більшості імпульсів кількість максимальних значень перевищує 1), зайві імпульси, які перекриваються з іншими, усуваються з подальшого розгляду з умови

$$x_i[p] > x_{i-1}[k], \quad (1)$$

де $x_i[p]$ – початковий індекс i -го імпульсу; $x_{i-1}[k]$ – кінцевий індекс $(i-1)$ -го імпульсу.

У файлі, який аналізувався, для першої рейки таких імпульсів з великою амплітудою налічується 84. Відстані між максимумами коливались, в основному,

в межах від 2481 до 2593, однак є імпульси з кількістю відліків від сусідніх імпульсів від 1266 до 1278. Звідси можна зробити висновок, що певна регулярність цих імпульсів не може бути підставою для усунення їх від дослідження на предмет можливості того, що деякі з них відповідають дефекту у вигляді поперечної тріщини.

На рис. 3 відображений один з фрагментів сигналів з амплітудою, що перевищує 200. Цей сигнал має характерну форму і є сигналом від рейкового стику.

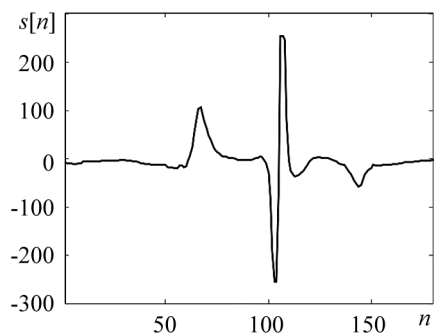


Рис. 3. Форма сигналу від рейкового стику.

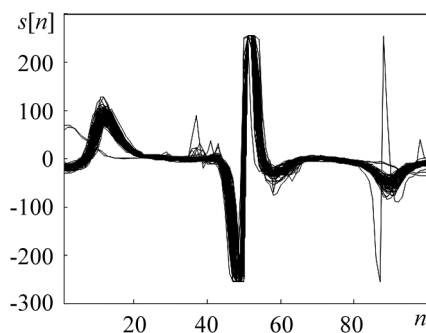


Рис. 4. Накладання всіх імпульсів з амплітудою, що перевищує 200.

Подібність форми фрагментів сигналів від рейкових стиків ілюструється рис. 4, на якому зображено всі 84 імпульси з амплітудою, що перевищує 200. Під час аналізу імпульсів від стиків будували кореляційну матрицю нормованих коефіцієнтів кореляції всіх імпульсів між собою:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^n s_i[k]s_j[k] / \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n s_i^2[k]\right)\left(\sum_{k=1}^n s_j^2[k]\right)}, \quad (2)$$

де $s_i[k]$, $s_j[k]$ – відліки i -го та j -го фрагментів сигналу; n – кількість відліків.

Значення коефіцієнтів кореляції були в межах від 0,522 до 0,998. Незважаючи на візуальну подібність імпульсів, використання звичайного коефіцієнта кореляції може бути непридатним, оскільки для найменшого коефіцієнта кореляції 0,522 зміщення одного з сигналів на 2 дискрети приводить до збільшення коефіцієнта кореляції до 0,637, на 1 дискрет до 0,774. У зв'язку з цим для кореляційного порівняння фрагменту сигналу з еталоном необхідно використовувати не коефіцієнт кореляції, а кореляційну функцію при зміщеннях на 1–5 дискретів.

Можливості використання вейвлет-перетворень для дослідження сигналів дефектоскопії рейок. Одним з використовуваних методів для виділення характерних ознак дефектів у сигналах дефектоскопії є метод неперервних вейвлет-перетворень. Зокрема, в роботі [1] використано такий метод. Однак як вейвлет-функції використано банк фільтрів Габора, який жодним чином не пов'язаний з особливостями досліджуваних сигналів. Аналогічним чином інші відомі вейвлет-функції, наприклад, **mexihat**, **Morlet**, сімейства **Daubechies** за формою не обов'язково є близькими до досліджуваного фрагменту сигналу.

У зв'язку з цим більш природним є використання як вейвлет-функцій при неперервних вейвлет-перетвореннях або експериментального сигналу для дефектної ділянки, або змодельованого сигналу, наприклад, як це розглянуто в [3]. Застосування неперервного вейвлет-перетворення сигналу для виділення фрагменту сигналу, “подібного” до заданої вейвлет-функції, базується на інтегральній нерівності Коші–Шварца:

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \right| \leq \left[\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \right|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

де $s(t)$ – досліджуваний сигнал; $\psi(t)$ – вейвлет-функція; a – масштаб; b – зміщення.

Знак рівності в цьому виразі отримують у тому випадку, якщо функції $s(t)$ та $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ пропорційні між собою, тобто форма фрагменту сигналу збігається з формою масштабованої та зміщеної вейвлет-функції. Оскільки вейвлет-функція звичайно нормується відповідно до виразу

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

то при відповідному попередньому нормуванні фрагмента сигналу $\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt = 1$

значення 1 буде максимальним значенням для вейвлет-перетворення.

У разі зміщення постійної складової досліджуваного сигналу, завдяки властивості вейвлет-функції, результат неперервного вейвлет-перетворення залишається незмінним:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} (s(t) + s_0) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt + \\ + s_0 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \end{aligned} \quad (5)$$

У версії пакету прикладних програм Wavelet Toolbox системи MATLAB 7.0 і вищих є функція створення нових вейвлетів для неперервного вейвлет-перетворення на основі зразка, заданого послідовністю відліків (функція **pat2cwav**). Оскільки заданий шаблон може мати ненульове значення інтегралу, ця функція обчислює достатньо регулярне наближення з нульовим інтегралом до заданої функції методом найменших квадратів.

Однак, оскільки в пакетах прикладних програм вейвлет-аналізу (в тому числі і в Wavelet Toolbox системи MATLAB) звичайно відсутні програмні засоби застосування вейвлет-функцій у вигляді довільної послідовності дискретних відліків, були побудовані в середовищі MATLAB функції для реалізації неперервного вейвлет-перетворення сигналів з довільною вейвлет-функцією. Ці функції були побудовані на основі модифікацій аналогічних функцій в Wavelet Toolbox (функції **cwt**, **intwave**). Модифікація цих програм полягає в тому, що на основі заданих дискретних значень вейвлет-функції будується за допомогою кубічної сплайн-інтерполяції функція, на основі якої табулюються значення функції з достатньо малим кроком, щоб забезпечити можливість масштабування аргумента в достатньо широких межах. Після цього, аналогічно до програми **intwave**, табулюються значення інтегралів цієї вейвлет-функції.

ВИСНОВКИ

1. Ідентифікація дефектів рейок на основі аналізу експериментальних сигналів вагона-дефектоскопа, отриманих магнітодинамічним методом, – це кількості-етапний процес. Перші етапи полягають у попередньому аналізі сигналів, вста-

новленні деяких інтегральних параметрів сигналу, зокрема, середнього значення, мінімального та максимального рівнів, меж, в яких наявні складові сигналу, що відповідають шпальним підкладам. Ця процедура здійснюється на основі побудови та аналізу функції залежності відносної кількості перевищень сигналом заданого рівня.

2. Фрагменти сигналів, що потенційно можуть відповідати дефектам рейок, визначаються з умови перевищення їх значення порогу, який в кілька разів перевищує рівень коливань від шпальних підкладок. Виділення цих фрагментів сигналу здійснюється за умовою перевищення в 3 рази рівня коливань від шпальних підкладок.

3. Фрагменти сигналу великої амплітуди, зумовлені рейковими стиками, характеризуються великою амплітудою (> 200), повторюваністю форми, що дає змогу ідентифікувати їх на основі порівняння з еталонним сигналом, однак ширина імпульсів залежить від відстані між стиками. Це визначає необхідність та можливість використання неперервного вейвлет-перетворення для зміни часового масштабу сигналу, при якому можливе кореляційне порівняння сигналу. У зв'язку з відсутністю в пакеті прикладних програм Wavelet Toolbox системи математичного моделювання MATLAB програмних засобів використання неперервних вейвлет-перетворень з вейвлет-функцією, заданою послідовністю дискретних відліків, були модифіковані наявні програми **cwt**, **intwave** для реалізації такого перетворення.

4. Інші фрагменти сигналів з амплітудою, що перевищує порогове значення, значно складніше ідентифікувати з певними типами дефектів. Для розпізнавання цих сигналів необхідне накопичення експериментальних даних, отримання статистичних параметрів, використання математичних моделей дефектів з наступним можливим застосуванням нейромережових класифікаторів, в тому числі вейвлет-нейронних мереж.

1. *Rail Defect Diagnosis Using Wavelet Packet Decomposition* / Н. А. Toliyat, К. Abbaszadeh, М. М. Rahimian, L. E. Olson // *IEEE Transactions of industry applications*. – 2003. – 39, № 5, September/October. – P. 1454–1461.
2. *Максимов М. Н.* Алгоритмы обнаружения нерегулярных фрагментов сигналов от датчиков магнитного вагона-дефектоскопа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999. – 27 с.
3. *Королев М. Ю.* Магнитодинамический метод контроля рельсов. Методология расчета полей и сигналов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2003. – 26 с.
4. *Нічого В. О., Дуб П. Б., Іванчук В. М., Романишин Ю. М.* Дослідження сигналів магнітодинамічної дефектоскопії на Львівській залізниці // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія), вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць.* – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2008. – С. 8–19.
5. *Інструкція по использованию комплекса “Дефектоскоп”.* Версия 2.1. – НКФ “Логика”, Киев, 1995-97. – 27 с.

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

*Одержано
20.01.2009*